

**ESTADO DEL ARTE EN MÉTODOS BIOTECNOLÓGICOS
POTENCIALES A SER EMPLEADOS PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS O SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO,
PROVENIENTES DE LA MINERÍA EN ZONAS CON
ANTECEDENTES DE EXPLOTACIÓN MINERA AURÍFERA**

YEISON JAVIER BENITEZ CAICEDO

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA AMBIENTAL
MANIZALES
2017**

**ESTADO DEL ARTE EN MÉTODOS BIOTECNOLÓGICOS
POTENCIALES A SER EMPLEADOS PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES CONTAMINADAS CON MERCURIO,
PROVENIENTES DE LA MINERÍA AURÍFERA**

YEISON JAVIER BENITEZ CAICEDO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título
de:**

Ingeniero Ambiental

Directora:

GLORIA MARIA RESTREPO FRANCO PhD.



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA AMBIENTAL
MANIZALES
2017**

Nota de aceptación

Firma de Director del Trabajo de Grado

Firma del Presidente del Comité de Programa

Firma de Evaluador

DEDICATORIA

A ti Dios y tu santísima Madre María, que han estado conmigo durante todos estos años y a pesar de que muchas veces pensé en tirar todo por la borda, ustedes me dieron la fortaleza suficiente para seguir adelante y hacer que esta meta se cumpliera.

A mi familia, por su apoyo, paciencia y confianza.

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de este proceso he contraído deudas de gratitud con muchas personas a las cuales me gustaría expresar, desde estas cortas líneas, mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar quiero dar las gracias a la señora Amanda Mosquera García Rectora de la Institución Educativa Agroambiental y Ecológica "Luis Lozano Scipion" y a Carlos Eduardo Machado y su grupo de compañeros, quienes me dieron la oportunidad de salir de mi pequeño municipio y venir a una ciudad como Manizales a prepararme para afrontar los desafíos de la vida.

A mi directora, doctora Gloria María Restrepo Franco, Coordinadora de Posgrados de la Universidad Católica de Manizales, por enseñarme el sentido de la responsabilidad, por su dedicación y esfuerzo durante la supervisión de este trabajo. Le agradezco sinceramente, porque cuando muchos no daban nada por este proceso, ella lo tomo como suyo y me ayudó a finalizarlo con éxito.

Quiero hacer una especial mención a las Hermanas de la Caridad Dominicanas de la Presentación de la Santísima Virgen, en cabeza de la hermana Rectora Elizabeth Caicedo Caicedo, quienes me brindaron en todo momento su apoyo incondicional, acompañándome durante este proceso, por su buena voluntad, paciencia y cordialidad desde la filosofía de la Universidad Católica de Manizales y en especial el carisma de *Marie Poussepin*, aún cuando con mis requerimientos les apartara de su trabajo.

De igual manera, quiero agradecer a todas las demás personas que en uno u otro momento me ayudaron de manera desinteresada. Especialmente al Pbro. Octavio Barrientos Gómez, Mg. Carlos Eduardo García López, Esp. María Fernanda Ortiz Revelo directora, Dr. Alejandro Rincón Santamaría y al Esp. Cristian Leonardo Rocha Osorio; quienes con su aporte también me permitieron cumplir este sueño.

Mis agradecimientos, también al Grupo de Investigaciones en Desarrollos Tecnológicos y Ambientales (GIDTA), por permitirme desde su línea de investigación presentar este trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental, y por recoger mis recomendaciones para futuras investigaciones.

Por último quiero agradecer a mis hermanos quienes son mi principal motivación y a mis amigos por siempre motivarme a ser mejor.

CONTENIDO

Contenido

1. ENFOQUE DE LA TESIS.....	9
1.1. CONTEXTO	9
1.2. MARCO LEGAL DE LA ACTIVIDAD MINERA EN COLOMBIA.....	9
1.2.1. Ministerio de Minas y Energía (MME).....	10
1.2.2. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).....	10
1.3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	12
1.4. OBJETIVOS	14
1.4.1. Objetivo General	14
1.4.2. Objetivos Específicos	14
1.5. ANTECEDENTES	14
1.6. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.7. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN DE TEMA.....	16
2. REFERENTE TEÓRICO.....	19
2.1. SECTOR MINERO AURÍFERO EN COLOMBIA	19
2.2. MINERÍA ILEGAL EN COLOMBIA.....	20
2.3. SECTOR MINERO AURÍFERO EN CALDAS	21
2.4. USO DE MERCURIO EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE APROVECHAMIENTO DEL ORO Y SUS CONSECUENCIAS.....	22
2.5 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS- BIORREMEDIACIÓN.....	24
2.5.1 Ficorremediación.....	25
2.5.2 Fitorremediación.....	26

2.5.3. Rizorremediación.....	27
2.5.4. Bioadsorción.....	27
3. MÉTODOS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE MERCURIO.....	29
3.1 Estado del Arte	29
3.2 Aspectos clave a considerar en el tratamiento biológico de agua residual proveniente de la minería aurífera.....	35
3.2.1. Tratamiento biológico: Fitorremediación.....	35
3.2.2. Tratamiento biológico: Ficorremediación.....	36
3.2.3. Tratamiento biológico (Rizorremediación).....	36
3.2.4. Tratamiento biológico (Bioadsorción).....	37
4. CONCLUSIONES.....	68
5. BIBLIOGRAFIA	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad ambiental vigente sobre la minería.....	10
Tabla 2. Filtros empleados en la búsqueda bibliográfica realizada en las bases de datos <i>Science Direct</i> y <i>Springer Link</i>	17
Tabla 3. Comparación entre el número de reportes por descriptor en las bases de datos <i>Science Direct</i> y <i>Springer</i> , durante el informe preliminar y luego de la selección.....	32
Tabla 4. Comparación de los estudios experimentales sobre métodos biotecnológicos empleados en el tratamiento de residuos contaminadas con mercurio.....	39

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Distribución de reportes seleccionados con base en los descriptores los *mercury detoxification*, *biosorption of mercury*, *phytorremediation of mercury*, *rhizoremeditation of mercury* y filtros en las bases de datos *Science Direct* y *Springer* (2006-2017).....**33**
- Figura 2.** Distribución de los reportes en las temáticas de estudio, en los trabajos específicos en degradación de mercurio (entre el 2006 y 2017).....**34**
- Figura 3.** Distribución anual de artículos de investigación y de revisión de tema, en los 53 reportes de trabajos de degradación de mercurio.....**34**
- Figura 4.** Distribución de los reportes en las temáticas de estudio, en los trabajos específicos en degradación de metales pesados (entre el 2006 y 2017).....**35**
- Figura 5.** Distribución anual de artículos de investigación y de revisión de tema, en los 37 reportes de trabajos de degradación de metales pesados.....**35**

1. ENFOQUE DE LA REVISIÓN DE TEMA

1.1. CONTEXTO

La minería aurífera es quizás una de las actividades más antiguas desarrolladas por el hombre, junto con la agricultura. La explotación minera, ha venido creciendo paulatinamente en el mundo a través de los últimos años, gracias a que muchas familias han basado su economía en la extracción empírica de los metales preciosos; sin embargo esta situación no ha estado acompañada de técnicas que regulen los procesos que allí se desarrollan, los cuales se ven magnificados con la llegada de la minería a gran escala realizada por las multinacionales, que han conllevado a afectaciones de los ecosistemas y de las comunidades circundantes (Alvarez, Sotero, Brack, & Ipenza, 2011).

En América Latina donde nuestros antepasados fueron grandes orfebres, las condiciones socioeconómicas convirtieron a esta actividad de uso del suelo, en una de las más atractivas desde el punto de vista financiero y a la vez en una de las más dañinas de la región (Hammond, 2013).

Colombia es un país rico en recursos minerales debido a los procesos geológicos que formaron sus valles, cordilleras y costas. Esta tradición minera arraigó la minería de oro en diferentes zonas geográficas del país. Actualmente en el departamento de Caldas se destacan los municipios de Marmato, La Felisa, Riosucio, Filadelfia, Villamaria y Manizales, por nombrar solo algunos de los más representativos por su tradición minera (PNUMA - MADS, 2012).

La presente monografía busca realizar una revisión temática sobre los métodos biotecnológicos potenciales para el tratamiento del agua residual proveniente del proceso de extracción minera; adicionalmente el presente trabajo describe la problemática relacionada con la contaminación de los recursos hídricos a causa de la minería.

1.2. MARCO LEGAL DE LA ACTIVIDAD MINERA EN COLOMBIA

La actividad minera en Colombia es considerada como una actividad de utilidad pública y de interés social. El artículo primero de la Ley 685 del 2001 que expide el Código de Minas, establece como objetivos de interés público “fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos

mineros de propiedad estatal y privada; estimular estas actividades en orden a satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y a que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país" (Ministerio de Minas y Energía, 2001)

La Tabla 1 relaciona la evolución de la normatividad ambiental entre los años 1974 y 2013, dentro de los cuales se incluye el actual Código de Minas.

Tabla 1. Normatividad ambiental vigente sobre la minería.

Ley o decreto	Nominación
Decreto Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente
Ley 685 de 2001	Actual Código de Minas
Ley 1333 de 2009	Régimen Sancionatorio Ambiental
Decreto 2820 de 2010	Reglamentación licencias ambientales
Decreto 3930 de 2010	Usos del agua y residuos líquidos
Ley 1450 de 2011	Multas, reservas mineras estratégicas, prohibiciones a la minería por razones ambientales
Resolución 205 de 2013	Se establece el procedimiento para la declaración y delimitación de Áreas de Reserva Especial
Ley 1658 de 2013	Disposiciones para el uso del mercurio, reducción eliminación del mercurio

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar el Gobierno Nacional emprende el trabajo de garantizar la protección de los recursos naturales en torno a la actividad minera, a través de leyes, decretos y resoluciones de diferentes instituciones que se encargan del cumplimiento normativo, como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible al legislar acerca del uso del mercurio y de los diferentes contaminantes que afectan el entorno. La ley 1658 del 2013 identifica el uso del mercurio asociado a las diferentes actividades productivas, especialmente a la actividad minera, y reconoce los impactos ambientales en el aire, el agua y el suelo que ponen en riesgo los servicios ecosistémicos y la salud de las personas expuestas a la sustancia, tanto de manera directa como indirecta y cuya responsabilidad se identifica como un ciclo que se inicia en el usuario minero e involucra a las instituciones del sector. Igualmente legisla la erradicación del uso del mercurio para la minería en un plazo máximo de 5 años a partir de la

expedición de la ley. Lo cual genera la necesidad de realizar investigaciones en alternativas limpias, que disminuyan el uso de mercurio en la extracción del oro.

En este contexto existen varios actores e instancias gubernamentales que intervienen en la formulación, adopción e implementación de las políticas relacionadas con la actividad minera en el territorio nacional. Las entidades encargadas de la revisión y aplicación de las normas ambientales en la minería aurífera a nivel Nacional, regional y local son:

1.2.1. Ministerio de Minas y Energía (MME)

Es el organismo rector de las políticas públicas del sector de minas y energía. Su función es la de adoptar e implementar programas orientados al aprovechamiento de las fuentes energéticas y los recursos naturales no renovables asegurando el desarrollo sostenible de estos últimos. Según el Decreto 0381 de 2012, las entidades adscritas al Ministerio de Minas y Energía son (Martínez, 2014):

- Agencia Nacional Minera (ANM): Es la institución que gestiona los recursos mineros del Estado nacional y promueve su aprovechamiento en concordancia con las normativas ambientales. Tiene carácter de autoridad minera para otorgar o negar títulos de exploración y explotación que son competencia del MME.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC): Es el centro de investigación científica y aplicada de orden nacional que realiza, entre otras funciones, la identificación y zonificación del subsuelo colombiano y los recursos naturales involucrados (minerales, hidrocarburos, aguas subterráneas, etc.).

1.2.2. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)

Es la instancia máxima de gestión del medio ambiente y responsable de la formulación de la política ambiental a fin de proteger el patrimonio natural del territorio y garantizar el desarrollo sostenible. Según la Ley 99 de 1993, las entidades adscritas y unidades administrativas del MADS son (Martínez, 2014):

- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA): Es el organismo técnico encargado de hacer cumplir la normativa ambiental a la cual están sujetas las actividades que requieren licencias ambientales de competencia exclusiva del MADS.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM): Es el centro de investigación de orden nacional que brinda apoyo técnico

y científico sobre la caracterización ambiental y ecosistémica del territorio colombiano.

- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander Von Humboldt”: Es el centro de investigación científica responsable de evaluar el estado de la biodiversidad de Colombia y de sus recursos bióticos e hidrobiológicos.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés”, INVEMAR: Es una organización de investigación tecnológica y científica aplicada a los recursos naturales y ecosistemas oceánicos y costeros adyacentes al territorio nacional.
- Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI: Es el instituto de investigación científica encargado de la realización y divulgación de estudios de orden biológico, social y ecológico de la región amazónica.
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico “John Von Neumann”, IIAP: Es el centro de investigación científica del medio ambiente del Litoral Pacífico y del Chocó Biogeográfico.
- Sistemas de Parques Nacionales Naturales (PNN): Es la unidad que administra las áreas de importancia natural a nivel nacional con el fin de preservar en ellas los ecosistemas, bienes y servicios ambientales que aportan a la diversidad cultural y el desarrollo sostenible de la nación.
- Fondo Nacional Ambiental (FONAM): Es una cuenta presupuestal destinada a financiar inversiones en planes y proyectos ambientales. El FONAM no es una institución con personal directivo y administrativo como el resto de entidades.

En el nivel territorial actúan las CAR y las secretarías ambientales de los departamentos y municipios grandes:

- Corporaciones Autónomas Regionales (CAR): De acuerdo a la Ley 99 de 1993, las CAR son entes públicos y corporativos que ejercen como autoridad ambiental en el área de su jurisdicción y son responsables de la ejecución de las políticas ambientales nacionales.
- Entidades territoriales: Según el artículo 66 de la Ley 99 de 1993, los municipios, distritos o áreas metropolitanas que tienen una población igual o superior a 1'000.000 de habitantes, tendrán las mismas funciones de la CAR en lo aplicable al medio ambiente urbano.

1.3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La polémica sobre la minería en Colombia se centra en sus efectos sobre el medio ambiente, el entorno socioeconómico y cultural. Para algunos debería haber una decisión de excluir todo el territorio nacional de la minería. Para otros, los recursos de las regalías, los impuestos que se recaudan, las exportaciones y la inversión extranjera que mejoran el saldo externo y el empleo que genera, son razones suficientes para afirmar que la incidencia ambiental es un mal necesario. Una reflexión adicional tiene que ver con el derecho de las próximas generaciones a disfrutar de la naturaleza y un ambiente sano. En este trabajo se examina una parte de esta problemática, y sobre todo las posibles soluciones biotecnológicas con potencial para ser empleadas en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la minera.

El daño ambiental es uno de los aspectos más delicados en la minería aurífera. Las malas prácticas y la manipulación inadecuada de sustancias tóxicas utilizadas en la extracción del oro han causado daños personales y ambientales durante décadas. En un negocio minero se usan 35 kilogramos de mercurio, se vierten 330 galones de aceites usados y se introducen en el ambiente entre 2.000 y 3.000 toneladas de sedimentos al año (Hernández, 2012). Entre las causas de la contaminación ambiental también se pueden mencionar el mal manejo de la extracción de minerales especialmente en el ámbito de la minería ilegal; la falta de organización, coordinación y control por parte de los organismos estatales y la escasa responsabilidad de grandes empresas mineras (Hernández, 2012).

A partir de estos planteamientos se formulan las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es la importancia real de la industria minera para Colombia, y cuál es el impacto ambiental que esta actividad genera?
- ¿Qué está haciendo la industria minera para mitigar el impacto negativo de sus residuos sobre el recurso hídrico?
- ¿Es posible aplicar tratamientos biotecnológicos sobre los residuos industriales provenientes de la actividad minera?
- ¿Qué condiciones se deben asegurar para aplicar tratamientos biotecnológicos en aguas residuales provenientes de la minera?

Para dar respuesta a estas preguntas se plantea la necesidad de investigar el estado del arte en el tema de biorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes del sector minero, realizando una revisión integral de las características y particularidades que deben tenerse en cuenta en el establecimiento de sistemas de biodegradación que permitan utilizar el potencial metabólico de los microorganismos para transformar este contaminante proveniente de la industria minera en compuestos más simples, poco o nada contaminantes (Martín & Gallego, 2003).

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Evaluar a través de un estudio del estado del arte, los métodos biotecnológicos potencialidades en el tratamiento de las aguas residuales contaminadas con mercurio, provenientes de la minería.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar la importancia del sector minero y su impacto ambiental en el departamento de Caldas.
- Analizar el estado del arte sobre el uso de los tratamientos biológicos, de efluentes contaminados con mercurio provenientes de la minería.
- Proponer basado en el estado del arte, las posibles investigaciones que aportarían a la solución en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con mercurio, provenientes de la minería.

1.5. ANTECEDENTES

El tratamiento de residuos líquidos provenientes de la minería se ha evaluado principalmente a partir de la utilización de macrófitas acuáticas (Arroyabe, 2004), como las especies *Lemna minor* (*lenteja de agua*) y *Eichornia crassipes* (*jacinto de agua*) (Martelo & Borrero, 2012). Se ha demostrado que la capacidad de absorción de las macrófitas acuáticas al mercurio es de un 29,5%, mostrando un efecto positivo en la remoción de este elemento del agua (Jumbo & Campoverde, 2012).

Garzón Gutiérrez & Rodríguez Miranda (2015), a través de la realización de un estado del arte de las investigaciones realizadas para el tratamiento de las aguas provenientes de la minería, identificaron que el 35% de los estudios correspondían a métodos de adsorción, seguidos del 20% de estudios en biorremediación, el 15% en investigaciones en nanotecnología y el 10% de electrocoagulación.

Igualmente, la literatura reporta la existencia de numerosas tecnologías que permiten el tratamiento de mercurio, entre las que se indican la precipitación; coagulación/co-precipitación y la adsorción con carbón activado. Adicionalmente, existe el intercambio iónico que históricamente ha estado limitado al uso de resinas aniónicas para procesar aguas residuales industriales con contenido de mercurio inorgánico (Rojas & Gárate, 2011).

También es importante destacar que desde hace décadas se han desarrollado investigaciones, relacionadas con la biorremediación bacteriana de mercurio; sin embargo, la aplicación de hongos y algas para este fin constituyen áreas menos exploradas. Adicionalmente, se están estudiando nuevas áreas dentro de la remediación biológica de mercurio, como la rizorremediación y el uso de plantas transgénicas, las cuales necesitan ser más estudiadas con el objetivo de explotar aún más su potencial biotecnológico. Por otra parte, se debe profundizar en los aspectos de aplicación de estos sistemas al tratamiento de efluentes industriales y/o ambientes contaminados con mercurio, como lo concerniente a los procesos mineros (Paisio, González, Melina, & Elizabeth, 2012).

1.6. JUSTIFICACIÓN

En gran parte de los territorios de los países de economías emergentes, hay poblaciones que viven en medio de altos niveles y/o índices de contaminación de sus fuentes hídricas; debido a la existencia en sus localidades de minas explotadas a gran escala que generan vertimientos a los cuerpos de agua, tendientes a la recuperación de los recursos mineros, sin ningún tipo de tratamiento y sobrepasando los parámetros indicados por la autoridad ambiental competente al interior de los territorios nacionales, como por ejemplo las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

El estudio de las aguas residuales procedentes de la minería y la propuesta de un tratamiento eficiente puede contribuir a mitigar los impactos que se presentan en los cuerpos de agua donde se realiza la explotación, disminuyendo la carga contaminante.

El planteamiento de tecnologías de tratamiento biotecnológico, para el caso particular del agua residual de las minas, presenta las siguientes ventajas: i) bajo uso de insumos químicos, bajo o nulo uso de energía no-natural, baja generación de lodos; ii) hay un bajo requerimiento de operación y mantenimiento, iii) la disposición de lodos tiene un costo relativamente bajo debido a que la cantidad de lodos generado es bajo.

A su vez, el bajo consumo de insumos y de energía no-natural, y los bajos requerimientos de operación y mantenimiento implican ahorros económicos significativos en comparación con las tecnologías de tratamiento convencionales (Lizarazo Becerra & Orjuela Gutiérrez, 2013).

“En Colombia la minería es un sector estratégico para su desarrollo. En una carrera sin control ni reglas claras, esta actividad hace trámite en el territorio, arrastrando una estela de problemas sobre la sociedad, el ambiente, el bienestar y la salud de las personas. Aunque la prensa ha evidenciado problemas de salud sobre la minería en Colombia, poco está disponible en la literatura científica. La razón no es que los impactos y situaciones no existan, sino, que se ha realizado poca investigación” (Verbel, 2010).

Lo anterior tiene varias aristas: la comunidad no conoce lo que ocurre, y por tanto participa poco; los gobernantes no poseen datos para tomar acciones que minimicen los impactos, y aunque la academia/gobierno investigue y muestre los problemas y sus posibles orígenes o soluciones, el interés en resolverlos no se concreta, y dichos estudios no son empleados como línea base para avanzar ni como soporte para políticas públicas.

El presente proyecto busca realizar una revisión temática sobre métodos biotecnológicos con potencial para el tratamiento del agua residual contaminada con mercurio, proveniente del proceso de extracción minera. Así, contribuye a plantear opciones de degradación del mercurio, los metales pesados y otros compuestos tóxicos, resultantes de esta actividad, en pro de la protección de la vida animal, vegetal y humana, que es afectada por los compuestos tóxicos. Además, el presente proyecto busca recopilar experiencias concernientes a la aplicación de los métodos biológicos en la recuperación del recurso hídrico; ya que estos métodos para países de economías emergentes resultan sumamente económicos. Esta revisión de tema también es importante, ya que permite analizar las posibles mejoras que se evidencien en estos procesos de explotación con la aplicación de los métodos biotecnológicos; además con el ideal de identificar los métodos más eficientes o las condiciones de operación más favorables, para la descontaminación de aguas residuales provenientes del sector minero, y disminuir así los impactos ambientales en estos territorios, analizando la incorporación de estas tecnologías para el mejoramiento de las condiciones de vida de la población.

El presente proyecto aportará al estado del arte desarrollado en el marco de la línea de investigación en Saneamiento, desarrollo y gestión ambiental del programa de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UCM.

1.7. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN DE TEMA

La presente revisión de tema consta de un capítulo introductorio y de contextualización del problema de investigación, seguido de cuatro capítulos entre los que se incluyen dos capítulos en los cuales se desarrolla el cuerpo del trabajo, y dan cumplimiento a los objetivos específicos planteados, seguido de los capítulos de conclusiones y recomendaciones soportados a partir de los resultados obtenidos.

El rastreo inicial se realizó a través de los motores de búsqueda Google y Google Académico empleando los descriptores biorremediación de mercurio con el primero y, estudio sobre el uso de la biotecnología para la degradación de mercurio en aguas residuales provenientes de la minería con el segundo.

Posteriormente se realizó una consulta más específica en las bases de datos *Science Direct*, *Springer Link* y *Scielo (Scientific Electronic Library Online)*. La búsqueda se limitó a artículos comprendidos entre enero de 2006 y enero de 2017. Los descriptores empleados con las bases de datos fueron *mercury detoxification*, *mercury biosorption*, *mercury phytoremediation*, *mercury rhizoremediation*; adicionalmente en la base de datos *Scielo* se emplearon los descriptores detoxificación, bioadsorción, fitorremediación, rizorremediación de mercurio, mercurio y *mercury*. Para refinar la búsqueda se emplearon los filtros de búsqueda suministrados por cada base de datos (Tabla 2).

Tabla 2. Filtros empleados en la búsqueda bibliográfica realizada en las bases de datos *Science Direct* y *Springer Link*.

Base de datos	Filtros aplicados
<i>Science Direct</i>	<i>Topic: mercury</i> <i>Content type: Journal</i> <i>Date published: 2006-2017</i>
<i>Springer Link</i>	<i>Content type: Article</i> <i>Discipline: Environment</i> <i>Sub-discipline: Pollution and remediation</i> <i>Language: English</i> <i>Date published: 2006-2017</i>

Luego de obtener los reportes con cada descriptor, se verificó a través de los resúmenes de los artículos, la correspondencia con la temática base de esta revisión de tema. De esta manera se realizó una depuración de los artículos obtenidos.

A la muestra de artículos seleccionada se le realizaron diferentes análisis, así:

- Distribución de artículos de acuerdo con los tratamientos empleados para la degradación o remoción del mercurio.
- Clasificación de acuerdo con el tipo de artículo (de investigación o de revisión de tema).
- Tendencias en los temas de investigación en el periodo comprendido entre 2006 y 2017.
- En los artículos resultado de investigación se les identificaron las condiciones experimentales, y la conclusión del estudio.

2. REFERENTE TEÓRICO

2.1. SECTOR MINERO AURÍFERO EN COLOMBIA

La minería en Colombia ha tenido un impacto económico significativo en los últimos años, llegando a representar el 2,1% del PIB nacional. El sector minero representa un componente fundamental de las exportaciones colombianas; por esta razón se convirtió en uno de los principales sectores de nuestra economía (Cárdenas & Reina, 2008).

Durante años el país fue considerado como de alto riesgo para la inversión de las multinacionales mineras, debido a las condiciones de seguridad. Sin embargo, con las medidas en materia de orden público adoptadas por el gobierno nacional, se garantizan las condiciones necesarias para una nueva etapa en la explotación de oro en Colombia. El interés del gobierno por promover la explotación minera, radica en el incremento del precio del oro a nivel internacional. El descubrimiento en Cajamarca, departamento del Tolima, de una mina comparable con las más grandes del mundo, ha generado una gran expectativa por la cantidad de recursos que esto puede representar para las inversiones que necesita el país (Mendoza, 2014).

El aumento de la inversión extranjera y las exportaciones de la minería colombiana, han presentado un significativo aumento desde el año 2002. Paralelamente, la creciente participación de la minería en el desarrollo económico de algunos departamentos constituye un punto de partida en el análisis del desarrollo económico territorial, en la medida en que el sector tiene gran importancia como generador de ingresos por exportaciones e impuestos (Ministerio de Minas, 2014).

Del mismo modo, a finales del 2012, se llevó a cabo un censo sobre minería en cuatro de los departamentos con mayor producción aurífera y altos niveles de informalidad en la extracción del metal, dentro de los cuales se destaca Caldas. Además, se establecieron áreas con potencial minero y de reserva estratégica del Estado. Este estudio del gobierno nacional, buscó conocer y caracterizar de manera más precisa la actividad minera, a través de la implementación de sistemas de información, que permitieran establecer con certeza las condiciones en que se encontraba la minería en Colombia y obtener así un Censo Minero Nacional (Pacchioni, Moreno, & Roberto Asmat, 2014) (Bernal González, 2012).

De esa manera, el Censo Minero indicó que en Colombia hay aproximadamente 14.357 unidades de producción minera, donde se destacan principalmente tres proyectos con alta viabilidad, ubicados en

La Colosa, Gramalote y Angostura, en el departamento de Antioquia (Ministerio de Minas, 2001) (Ministerio de Minas, 2014).

Por otra parte, los datos estadísticos del Censo permiten definir el comportamiento del país en cuanto a la producción de oro, el cual pasó de estar en 2009 en el puesto 48 con una participación mundial del 2%, a ocupar el puesto 19 en 2011, gracias a la producción de aproximadamente 55,9 toneladas de oro, lo cual representa un crecimiento del 13% con respecto a los años anteriores (Martínez & Aguilar, 2013). Además Colombia posee unas 10,4 toneladas de oro, lo que equivale a un 1,6% de las reservas existentes en el mundo (Cárdenas & Reina, 2008).

Del mismo modo, las dificultades para el avance del sector tienen relación con información insuficiente y desactualizada (informalidad de manejo de información de las minas), fiscalización deficiente, falta de coordinación de las autoridades, problemas de logística, infraestructura y seguridad (Villar, 2016).

En consecuencia, la existencia de unidades de producción minera sin título en regiones como Antioquia, Chocó y Valle del Cauca, generan pérdidas incalculables de recursos; ya que, al no existir títulos no hay pago de regalías. Lo anterior, está relacionado con la falta de herramientas empresariales como contabilidad e inventarios, que permitan una organización de las minas y una adecuada explotación de los recursos naturales (Ministerio de Minas, 2012).

2.2. MINERÍA ILEGAL EN COLOMBIA

El avance de la minería como una de las principales actividades económicas del país, ha originado una serie de daños en los ecosistemas, sobre todo cuando estos procesos se desarrollan en áreas de protección ambiental. La explotación ilegal del oro, es realizada principalmente por organizaciones al margen de la ley que buscan lucrarse a costa de los recursos naturales del país, creando conflictos y problemas de orden público, desatando círculos de criminalidad, corrupción e inseguridad, que frenan el crecimiento de las regiones (Torres Gutiérrez, Pinzón Salcedo, Esquivia Zapata, Parra Pizarro, & Espitia Jiménez, 2010).

En la mayoría de los municipios del país ha existido minería ilegal. Siendo los departamentos del eje cafetero, los que tienen el mayor número de municipios con esta condición. Las unidades de explotación minera ilegal en el país extraen principalmente materiales de construcción y, en menor medida, oro y carbón (Ministerio de Minas, 2016) (Bernal González, 2012).

Las autoridades colombianas han creado grupos interdisciplinarios y políticas públicas, para combatir la ilegalidad en las minas. Sin embargo, estas estrategias no han logrado neutralizar a las bandas criminales, generando un ambiente de incertidumbre que desincentiva la inversión extranjera en el país. El reto es crear estrategias que permitan un control sobre la extracción del oro y ambientes laborales más seguros (Bernal González, 2012).

Esta situación está fuera de control, debido a que los mineros no cuentan con los títulos mineros, ni con las licencias ambientales, lo que ocasiona grandes afectaciones a los recursos naturales porque lo anterior limita la tecnificación de los procesos. Además, la minería ilegal genera empleos de mala calidad y en ocasiones permiten el trabajo infantil. La extracción ilícita de oro impacta gravemente a la minería legal, generando cuantiosas pérdidas, debido a las inversiones que realizan los mineros legales para su producción; y los innumerables recursos que dejan de llegar tanto a las familias aledañas a las zonas de extracción, como las regalías que aportarían para el desarrollo de las comunidades, el desarrollo energético, al agua y al medio ambiente en general (Sánchez Cortés & Vanegas Sánchez, 2015).

A pesar de que el gobierno a través de las entidades encargadas en materia ambiental, han expedido normas que buscan la eliminación y prohibición del uso del mercurio en los próximos 5 años, esto no ha podido materializarse debido a que en la actualidad siguen ingresando al país aproximadamente unas 118,8 toneladas del metal de forma clandestina, de contrabando por la frontera con Ecuador y en algunos casos es traído por empresas legalmente constituidas, que lo exportan para otras industrias; sin embargo, un gran porcentaje de este termina como parte de la minería ilegal, generando el problema ambiental y sanitario que está afectando gravemente al país en muchas zonas (Unidad Investigativa, 2017). Es así, como una parte del “veneno plateado”, como algunos investigadores lo llaman, es utilizado en la construcción de bombillas, de termómetros, en la industria farmacéutica y odontológica; otra parte de este, es llevado a las zonas mineras por medio de los nativos, quienes lo ingresan en envases de gaseosa o gasolina en pequeñas cantidades, para evitar los controles de las autoridades.

De acuerdo con una indagación realizada por la Unidad Investigativa del periódico El Tiempo (Unidad Investigativa, 2017), se ha identificado que Colombia está perdiendo el pulso en contra del uso del mercurio en la explotación del oro. Esto ha generado la contaminación de por lo menos 232 ríos en el país, que a su vez han afectado silenciosamente, unos 373

municipios. Las hectáreas afectadas superan las 100.000, ubicadas especialmente en departamentos como el Choco, Antioquia, Bolívar y Córdoba y en las zonas limítrofes con Perú y Brasil.

Para obtener un gramo de oro, se requieren aproximadamente unos 5 gramos de mercurio, esto multiplicado por el número de minas y la cantidad de gramos de oro extraída, está generando daños difícilmente remediabiles en las zonas donde se practica este tipo de minería. Este mercurio que es importado desde la China, puede superar las 50 toneladas por año.

Según datos de algunas ONGs como *Mercury Watch*, somos el tercer país que más libera mercurio a nivel mundial, con unas 75 toneladas al año aproximadamente, siendo superados solo por China e Indonesia. El mercurio que se desvía a las zonas de explotación minera, es distribuido y fundido por los negociantes de compraventa de oro, quienes lo regalan a los mineros a cambio de ser prioridad a la hora de vender el oro producido. Este fenómeno se da principalmente en municipios como Quibdó en el Choco, Nechí en Antioquia y Barbacoas en Nariño, donde es común que separen el oro de la amalgama con las manos o con sopletes a altas temperaturas, llegando a recuperar un 40 por ciento de mercurio; sin embargo, el otro 60 por ciento se dispersa en la atmosfera y empieza su efecto letal (Unidad Investigativa, 2017).

Nuestro país produce unas 58 toneladas de oro, y más del 86 por ciento de este es ilegal. Además, 232 de las 1.150 fuentes hídricas que cruzan el país, lo hacen por zonas donde predomina el uso de mercurio como el Choco, Nariño, Bolívar, Cesar y el Bajo Cauca.

El país ha detectado unos 7.000 puntos a través de sus satélites oficiales donde se utiliza el mercurio para la explotación de oro en ríos o aluvi6n en todo el territorio Nacional. De ahí que, la eliminaci6n del uso de este metal, le ahorraría al sistema nacional de salud unos \$931.000 millones de pesos (Unidad Investigativa, 2017).

La ley 1658 del 2013 identifica el uso del mercurio asociado a las diferentes actividades productivas, especialmente a la actividad minera, y reconoce los impactos ambientales en el aire, el agua y el suelo que ponen en riesgo los servicios ecosistémicos y la salud de las personas expuestas a la sustancia, tanto de manera directa como indirecta y cuya responsabilidad se identifica como un ciclo que se inicia en el usuario minero e involucra a las instituciones del sector. Igualmente legisla la erradicaci6n del uso del mercurio para la minería en un plazo máximo de 5 años a partir de la expedici6n de la ley. Lo cual genera la necesidad de realizar

investigaciones en alternativas limpias, que disminuyan el uso de mercurio en la extracción del oro y la recuperación de las zonas que están contaminadas con este metal.

2.3. SECTOR MINERO AURÍFERO EN CALDAS

La extracción minera en Caldas, se extiende aproximadamente a 17 de sus municipios, y gracias a esta actividad se obtiene oro, arena, platino, caliza, entre otros materiales de río (Osorio, 2015).

De los municipios de Caldas, históricamente el municipio de Marmato ha sustentado su economía en la explotación minera, constituyéndose esta actividad en la principal fuente de ingresos y de empleo para sus habitantes. Marmato es el primer productor de oro en el departamento de Caldas y el más antiguo del país (Alcaldía de Marmato, 2007).

Según cifras oficiales, el mercurio se está utilizando en el Choco, Nariño, Bolívar, Córdoba y el Bajo Cauca. En el departamento de Caldas, donde la minería aurífera se desarrolla principalmente en el municipio de Marmato, se ha informado que, en los procesos mineros ya no se utiliza mercurio; sin embargo, las autoridades ambientales no tienen certeza de dicha afirmación. De ser verdad, esto es bueno para el departamento, ya que desde el próximo 15 de septiembre del presente año, quedará prohibido el ingreso al país del mercurio para el uso minero. No obstante, el mercurio está siendo remplazado por el cianuro, que es igual de tóxico y que genera desastres de la misma naturaleza que el mercurio (Unidad Investigativa, 2017).

En el municipio de Marmato, actualmente se practican dos tipos de extracción de minerales (Álvarez, 2013):

- Minería artesanal: Consiste en el trabajo individual o familiar, el proceso de explotación es netamente físico y en él se integra grupos de 2, 3 y hasta 5 personas. Esta actividad se utiliza como un medio de sustento; por lo general, se los ubica en las quebradas, en donde las actividades y sistemas de explotación se realizan de manera rudimentaria con la generación de alta contaminación (Marín & Narvaez, 2013).
- Minería a pequeña escala: Sistema más tecnificado, que necesita de una inversión más fuerte en equipos tecnológicos y maquinaria pesada.

Durante el proceso de extracción de oro, el agua residual resultante se presenta en dos formas: i) Relaves de mina, el cual es el resultado del proceso de fragmentación del material una vez extraído el oro; y ii) Drenajes ácidos de mina, es el agua que viene de un proceso de

atenuación natural una vez pasa por los embalses de agua con mercurio (Lopez, 2015).

2.4. USO DE MERCURIO EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE APROVECHAMIENTO DEL ORO Y SUS CONSECUENCIAS

Generalmente el mercurio se usa para separar y extraer el oro de las rocas en las que se encuentra incrustado. El mercurio se adhiere al oro, formando una amalgama que facilita su separación de la roca, arena u otro material. Luego se calienta la amalgama para que se evapore el mercurio y quede el oro. Se usan varias técnicas diferentes que liberan distintas cantidades de mercurio (Timarán, Rodríguez, & Avelló, 2005):

- Amalgamación del mineral: consiste en añadir mercurio al mineral durante los procesos de trituración, molienda y lavado. En esta etapa el uso del mercurio es más contaminante. Generalmente el 10% del mercurio agregado se combina con el oro para producir la amalgama. El resto (el 90%) es sobrante y debe retirarse y recircularse, o en el peor de los casos se libera en el medio ambiente (PNUMA, 2008).

En el proceso de amalgamación del mineral, los niveles de mercurio son altos generando gran afectación a la salud humana por la constante exposición, tanto para los mineros como para otras personas. Los lugares donde se practican estos procesos de amalgamación son los mayores expuestos a sus contaminantes, generalmente los sedimentos y los peces, estos últimos acumulando en sus tejidos grandes cantidades de mercurio (Verbel, 2010).

- Concentración gravimétrica: Este proceso también es conocido como cribado, básicamente funciona en pro de la gravedad, los materiales más densos se concentran al final de las bateas, mientras que las partículas más livianas son arrastradas por acción y efecto del agua; finalmente se agrega mercurio para asociar las partículas que han quedado en el fondo de la batea con contenedores asociados al proceso, entre el 10 y 15% de mercurio perdido se asocia a este proceso minero (PNUMA, 2008).
- Quemado de la amalgama: En este proceso los mineros calientan la amalgama para recuperar el oro, la amalgama es depositada directamente al fuego. Los vapores generados por acción de la combustión liberan contaminantes en forma de emisiones atmosféricas. Para recuperar el mercurio liberado en este proceso, actualmente se están implementando retortas en las cuales el mercurio en forma de

vapor queda atrapado y posteriormente se condensa (Villas Boas & Sánchez, 2006).

Mediante estos procesos parte del mercurio es liberado a la atmósfera, o es depositado en los cuerpos de agua cercanos y transformado por las bacterias a metilmercurio, ión que se biomagnifica a través de la cadena trófica, afectando los peces, y a sus consumidores. El metilmercurio es un compuesto muy contaminante, más que el mercurio elemental; sin embargo ambos generan graves daños a la salud, por consumo o inhalación directa (Pérez, 2007). La forma elemental del mercurio, es el principal tóxico al que se puede exponer quienes desarrollan la actividad minera en Colombia.

Los estudios epidemiológicos sobre el mercurio en Colombia, son muy pocos a pesar de la relevancia del tema. Los datos más importantes sobre el tema, son mediciones de mercurio en aire y en humanos en la cuenca del Cauca y del Magdalena (Verbel, 2010).

En Segovia (Antioquia), se presentan los casos más dramáticos de exposición a mercurio en Colombia, debido a que en este municipio la medida de mercurio elemental puede alcanzar niveles muy altos (Cordy, 2013).

La exposición a mercurio puede producir temblor, pérdida de la memoria, dificultad para dormir (Bose-O'Reilly, y otros, 2003), desórdenes del movimiento como ataxia (Bose-O'Reilly, y otros, 2008), afectación de la audición (Sauders, y otros, 2013) y la muerte (Plumlee, y otros, 2013).

Finalmente es importante resaltar, que no todas las afectaciones encontradas en mineros auríferos derivan de la exposición a mercurio; ya que durante su trabajo en la mina se ven expuestos a otros contaminantes, en especial metales pesados (Plumlee, y otros, 2013).

2.5 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS- BIORREMEDIACIÓN

Los tratamientos biológicos, han surgido como alternativa para tratar los residuos generados por las actividades productivas del hombre a través de los siglos en áreas como los hidrocarburos y la minería. En los sitios donde se llevan a cabo dichas actividades, se genera la contaminación de los suelos y los cuerpos de agua, debido a la cantidad de residuos peligrosos obtenidos en sus procesos productivos (Sepúlveda & Trejo, 2002).

Los estudios realizados con estos tratamientos, han demostrado alta efectividad para la remoción de diferentes tipos de contaminantes en los

efluentes y en los suelos contaminados; y a pesar de ser relativamente nuevos, se convierten en una alternativa complementaria a los procesos físicos-químicos convencionales, ya que son económicos y tienen una alta eficiencia a través del empleo de organismos como bacterias, hongos, algas, plantas nativas y plantas modificadas según sea el contaminante que se desea remover.

El tipo de tratamiento empleado depende de las condiciones del sitio afectado y las capacidades de las tecnologías de remediación. Estas actúan conteniendo, separando o destruyendo los contaminantes que se requieren remediar (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009).

La efectividad de una tecnología de remediación, dependen de las características del contaminante y del medio que se desea tratar con ella. El principal método biológico estudiado hasta el momento es la biorremediación.

Los tratamientos por biorremediación, emplean una serie de técnicas que ayudan a recuperar los suelos y efluentes contaminados, reduciendo la toxicidad de los contaminantes orgánicos e inorgánicos, con procesos de degradación y transformación que permiten la remediación de contaminantes, a través del empleo de la actividad biológica natural de los organismos vivos como las plantas, los hongos y las bacterias. La biorremediación, no solo se refiere a tratamientos en los procesos con microorganismos (levaduras, hongos o bacterias), también emplea una serie de plantas o algas para sus procesos (López, Ramírez, García, Ibarra, & Sandoval, 2011).

Este proceso, se aplica principalmente en la remediación de suelos y aguas contaminadas. Su eficiencia depende de las condiciones del proceso de tratamiento, incluyendo pH, tiempos de retención, concentraciones en el agua tratada, entre otros. En algunos casos se han logrado altos porcentajes de remoción, sin embargo, con respecto al área tratada su eficiencia es baja. La biorremediación, se pueden desarrollar de forma aeróbica, si se producen en presencia de un medio oxidante, o anaeróbica cuando se utiliza un medio reductor. Las principales técnicas de tipo aeróbico empleadas son: *bioventing*, biopilas, y la atenuación natural. Estas técnicas requieren de parámetros de evaluación adecuados para cada uno, dentro de los intervalos de funcionamiento para que su aplicación efectiva (Maroto Arroyo & Rogel Quesada) (Romero, Iguá , & Boyacá, 2015).

Las bacterias, son los microorganismos más destacados en los procesos de biorremediación; ya que tienen una gran capacidad metabólica, y por

ello pueden degradar cualquier sustancia orgánica. Aunque, existen sustancias difíciles de degradar que forman mineralizaciones, y otras que son biotransformadas; sin embargo, este proceso puede generar daños más graves, debido a que las nuevas sustancias que se producen son mucho más nocivas para el ambiente. Hay otras sustancias, que no son degradadas por la acción bacteriana y se vuelven recalcitrantes, y se acumulan durante mucho tiempo en el ambiente de los lugares donde se produjo la contaminación (Lizcano, 2004).

La biorremediación, dependiendo del organismo utilizado se diferencia en ficorremediación, fitorremediación, rizorremediación y bioadsorción, principalmente (Lizcano, 2004).

Los tratamientos biológicos, muestran una serie de ventajas y limitaciones, en comparación con otras tecnologías convencionales, tales como:

- Son efectivos en cuanto a sus costos.
- Sus tecnologías no son dañinas para el medio ambiente y los contaminantes generalmente son eliminados.
- Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior.
- Sin embargo, los tiempos de los tratamientos son mayores, y no pueden emplearse si el tipo de agua – suelo (sustrato) no favorece el crecimiento microbiano.

2.5.1 Ficorremediación

La ficorremediación, es una biotecnología que ayuda a la recuperación de áreas contaminadas, utilizando de forma equilibrada los recursos naturales y generando un impacto positivo en el medio ambiente. Este tratamiento emplea macroalgas o microalgas, para remover o biotransformar los contaminantes en el agua. Estos organismos fotosintéticos, pueden metabolizar nitrógeno, fósforo y varios metales pesados (Ferrera Cerrato, Rojas Avelizapa, Poggi Varaldo, Alarcón, & Cañizares Villanueva, 2006).

Según los estudios conocidos sobre ficorremediación, sus principales aplicaciones y posteriores ventajas son (Vela, 2014):

- Remoción de nutrientes de aguas residuales y de efluentes ricos en materia orgánica.
- Disminución de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).
- Transformación y degradación de contaminantes orgánicos.
- Control de patógenos.

Desventajas

- Las condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de las especies para el respectivo tratamiento de las aguas residuales, son críticas. Estas condiciones incluyen: grado de exposición a la luz, aireación, mezclado homogéneo del cultivo, pH y temperatura óptima.
- El desarrollo de técnicas eficientes de remoción de nutrientes requiere mayor investigación para lograr obtener menores costos y mayores beneficios, para facilitar la implementación de proyectos de fitorremediación.

2.5.2 Fitorremediación

El mecanismo desarrollado por las plantas para sobrevivir en ambientes contaminados por compuestos orgánicos e inorgánicos, se denomina fitorremediación. Este proceso, aprovecha la capacidad de algunas plantas de absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos, como metales pesados y metales radioactivos *in situ* o *ex situ*. Esta técnica es de especial cuidado con el medio ambiente, ya que no utiliza reactivos químicos peligrosos y sus costos son más bajos que los tratamientos convencionales (López, Ramírez, García, Ibarra, & Sandoval, 2011).

Además, la fitorremediación actúa en los procesos de liberación de los contaminantes del suelo, es decir en la descontaminación y en la estabilización. Asimismo, este mecanismo de remediación de suelos y efluentes se subdivide en otras técnicas según la configuración del flujo, de la estructura de la unidad de tratamiento y del proceso físico-químico que se utilice para la remoción del contaminante. Existen aproximadamente siete formas de fitorremediación, entre las cuales se encuentran (Sepúlveda & Trejo, 2002) (Pulgarín, 2012):

- Fitoextracción
- Fitodegradación
- Rizodegradación
- Fitovolatilización
- Fitoestabilización
- Fitorrestauración
- Fitoestimulación

Las principales especies de plantas utilizadas en la fitorremediación, son:

- *Zea mays* L.
- *Panicum maximun* Jacq
- *Paspalum virgatum* L.
- *Echinochloa polystachya* H.B.K.
- *Sorghum vulgare* L.

- *Phaseolus vulgaris* L.
- *Phaseolus coccineus* L.
- *Chamaecrista nictitans* (L.) Moench.
- *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich) Stapf.
- *Triticum aestivum* L., *Hordeum vulgare* L.

Asimismo, existen plantas importantes para el tratamiento de agua rica en metales específicamente, como:

- *Phragmites australis*
- *Typha latifolia*
- *Typha anaustifolia*
- *Typha dominguensis*

Aunque la fitorremediación resulta una técnica muy eficiente, tiene sus ventajas y desventajas. A continuación se relacionarán las ventajas y desventajas de esta práctica (Delgadillo López, González Ramírez, Prieto García, Villagómez Ibarra, & Acevedo Sandoval, 2011):

Ventajas

- Su realización se puede dar *in situ* y *ex situ*.
- No transporta el sustrato contaminado, con esto se disminuye la propagación de contaminantes a través del agua o el aire.
- Es una tecnología limpia o sostenible.
- Tiene eficiencia para para contaminantes orgánicos e inorgánicos.
- Es muy económica.
- No requiere personal especializado para su operación.
- No requiere energía.
- Utiliza prácticas orgánicas convencionales.
- Es poco perjudicial para el ambiente.
- Actúa positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, debido a la formación de una cubierta vegetal.
- Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable.
- Evita la excavación y el tráfico pesado.
- Se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos.
- Permite el reciclado de recursos (agua, biomasa, metales).

Desventajas

- En especies como los árboles o arbustos, la fitorremediación es un proceso relativamente lento.
- Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizosfera de la planta.

- El crecimiento de las plantas está limitado por concentraciones tóxicas de contaminantes, por lo tanto es aplicable a ambientes con concentraciones bajas de contaminantes.
- En el caso de la fitovolatilización, los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente.
- Los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión.
- No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras.
- La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes.
- Se requieren áreas relativamente grandes.
- En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos.

2.5.3. Rizorremediación

La rizorremediación es una técnica de remediación biológica que utiliza la acción de las bacterias presentes en la rizosfera de las plantas que han surgido como vegetación natural, o que han sido introducidas para fitorremediar para degradar contaminantes de los suelos. Además, la utilización de plantas permite mejorar las propiedades fisicoquímicas de los suelos contaminados, y mejorar su aireación, lo que permite un incremento en el contacto entre bacterias y contaminantes (Rodríguez Conde, 2011).

El empleo de la rizorremediación en los procesos de eliminación de contaminantes en los suelos, tiene como ventajas (Paisio, González, Talano, & Agostini, 2012):

- Una gran superficie capaz de mantener una población de bacterias significativas proporcionada por las raíces.
- La inoculación y dispersión vertical de las bacterias, se realiza por medio de las raíces.
- La comunidad rizosférica permite el flujo de agua hacia las raíces lo que permite la biodisponibilidad de los contaminantes.
- No es necesario añadir fuentes de carbono exógenas; ya que las raíces disponen de los nutrientes necesarios para dicho proceso.
- Cuando termina el proceso de rizorremediación y un área ha sido eficazmente remediada, con la recolección de las plantas utilizadas en el proceso se elimina el nicho para las bacterias introducidas (de Cárcer García, 2007).

Desventajas (Paisio, González, Talano, & Agostini, 2012)

- El pH del afluente debe ser ajustado para obtener una óptima absorción
- Interacción de todas las especies químicas
- Es difícil controlar el efluente por ende el diseño del sistema debe cumplir con todos los requisitos.
- Las plantas deben ser cultivadas en un invernadero o vivero lo cual podría aumentar los costos de las plántulas.

2.5.4. Bioadsorción

El proceso de bioadsorción se produce cuando hay una captación por parte de una biomasa viva o muerta de diversas especies químicas, con mecanismos fisicoquímicos como la adsorción y el intercambio iónico. Este método, involucra una fase sólida donde la biomasa es solvente o adsorbente y una fase líquida donde se encuentran las especies disueltas que van a ser retenidas por el sólido. Para la realización de este proceso debe haber una afinidad del adsorbente con los adsorbatos, para que estos últimos sean transportados hacia el sólido donde son retenidos por diferentes mecanismos (Villanueva , 2000).

La bioadsorción surge como alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas contaminadas, cuando los iones metálicos se encuentran presentes a bajas concentraciones. La utilización de biomasa inerte en esta técnica, trae ventajas; ya que no es necesario adicionar nutrientes y el adsorbente resulta inmune a la toxicidad. A condiciones de operación adversas, los procesos no están gobernados por limitaciones biológicas, la recuperación de metales es más fácil y la biomasa se comporta como un intercambiador de iones. No obstante, lo anterior, se deben tener en cuenta los inconvenientes que este proceso conlleva tales como: una rápida saturación del sólido, alta sensibilidad hacia los cambios de pH, y el hecho que el estado de valencia del metal no puede ser alterado biológicamente, entre otros (Tovar, Ortiz, & Jaraba, 2015).

Desde los primeros intentos en la aplicación de la bioadsorción, han transcurrido más de 65 años, pero sólo desde hace dos décadas y por razones fundamentalmente de tipo económico y ambiental, las investigaciones desarrolladas se han centrado principalmente en el empleo de esta técnica para la eliminación de especies metálicas presentes a bajas concentraciones en efluentes líquidos, utilizando materiales bioadsorbentes de bajo costo (Quiñones Bolaños, Tejada, & Ruíz, 2014).

Ventajas y desventajas de la Bioadsorción (García Ríos, 2008)

Ventajas del uso de Biomasa Inerte

- No necesita nutrientes en la solución de alimentación, y además, es independiente del crecimiento y no está sujeta a limitaciones por toxicidad.
- Procesos no regidos por limitaciones metabólicas.
- La selección de la técnica de inmovilización no está regida por limitaciones de toxicidad o inactivación térmica.
- Los metales pueden ser liberados fácilmente y recuperados.
- La biomasa se comporta como un intercambiador de iones.

Desventajas del uso de Biomasa Inerte

- Saturación rápido: cuando los sitios de interacción con el metal están ocupados es necesario retirar antes el metal.
- La retención por adsorción es sensible al pH.
- El estado de valencia del metal no puede ser alterado bioquímicamente, por ejemplo, dándole formas menos solubles.
- Las especies orgánicas no son susceptibles de degradación.
- La mejora de estos procesos biológicos es limitada ya que las células no efectúan un metabolismo y la producción de agentes adsorbentes ocurre durante la etapa de crecimiento.

Ventajas del uso de las Células Vivas

- Aunque cada célula puede llegar a saturarse, el sistema se auto-restablece debido al crecimiento.
- Los metales se depositan en un estado químico alterado, menos sensible a la desorción espontánea.
- La actividad metabólica puede ser la única forma económica de lograr cambios en estado de valencia o degradar compuestos organometálicos; se pueden utilizar sistemas multi enzimáticos.
- Se pueden utilizar dos o más organismos de forma sinérgica.

Desventajas del uso de las Células Vivas

- Necesitan nutrientes para el crecimiento
- Es necesario alimentar los flujos bajo condiciones fisiológicamente permisibles.
- La toxicidad: solo se pueden tratar los metales a bajas concentraciones. Sin embargo, se han utilizado cepas resistentes a los metales.
- Los productos metabólicos pueden formar complejos con los metales, impidiendo la precipitación.

3. MÉTODOS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE MERCURIO

3.1 ESTADO DEL ARTE

El rastreo inicial se realizó a través del motor de búsqueda Google, en el cual se reportaron 15,300 resultados (hasta el 19 de enero de 2017); entre los cuales se identificó un artículo relevante, relacionado con una revisión bibliográfica sobre la remediación biológica de mercurio (Paisio, González, Melina, & Elizabeth, 2012) y dos documentos del gobierno colombiano asociados con estudios de la cadena de mercurio con énfasis en la actividad minera de oro y con la producción más limpia.

Posteriormente se continuó con el rastreo empleando el buscador Google Académico, en el cual se indagó sobre el estudio del uso de la biotecnología para la degradación de mercurio en aguas residuales provenientes de la minería, en el cual se obtuvieron 387 resultados en los últimos 10 años (hasta el 23 de enero de 2017). Los reportes encontrados en Google Académico corresponden en un 90% a documentos de trabajos de grado, tesis de maestrías y de doctorado.

Se realizó una consulta más específica en las bases de datos *Science Direct*, *Springer Link* y *Scielo (Scientific Electronic Library Online)*. Los descriptores empleados con las bases de datos fueron *mercury detoxification*, *mercury biosorption*, *mercury phytoremediation*, *mercury rhizoremediation*; adicionalmente en la base de datos Scielo se emplearon los descriptores detoxificación, bioadsorción, fitorremediación, rizerremediación de mercurio, mercurio y *mercury*. Para refinar la búsqueda se emplearon los filtros de búsqueda suministrados por cada base de datos.

En el proceso de búsqueda se apreció una mayor especificidad en la base de datos *Science Direct*. Lo anterior se verificó al contrastar la información del número de reportes por año de acuerdo con los descriptores y filtros empleados y el análisis de los resúmenes de los mismos, realizando una selección final de los artículos que corresponden a la temática de interés. En la Tabla 3, se puede apreciar el número de reportes obtenido preliminarmente y luego de la selección de los documentos acorde con la temática de investigación. Se evidenció en la base de datos *Springer* un alto número en el reporte de artículos por descriptor, pero al verificar en los resúmenes la pertinencia con la temática en estudio, se apreció que solo un bajo número de los reportes relacionados por año cumplía con el requisito.

En la base de datos Scielo con los descriptores *mercury detoxification*, *mercury biosorption*, *mercury phytoremediation*, *mercury rhizoremediation* no se obtuvieron reportes; con el descriptor mercurio se encontraron ocho documentos pero solo uno del año 2012 coincide con la temática objeto de esta monografía; finalmente con el descriptor *mercury* se hallaron 10 reportes de los cuales uno del 2013, está asociado a la temática.

Tabla 3. Comparación entre el número de reportes por descriptor en las bases de datos *Science Direct* y *Springer*, durante el informe preliminar y luego de la selección (A enero 23 de 2017).

	Science Direct										Springer																
Descriptor 1. Mercury detoxification																											
Etapa/Año	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025							
Preliminar	2	6	8	8	7	5	1	6	4	5	9	2	1	4	5	6	9	3	4	4	5	5	7	6	1		
Selección	1	1	3	0	0	2	6	0	1	2	5	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	6	1	0			
Descriptor 2. Mercury biosorption																											
Preliminar	4	0	2	2	1	3	3	3	6	3	1	1	3	6	3	9	9	9	1	0	1	9	2	6	7	2	3
Selección	4	0	0	0	0	2	2	1	6	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4	5	0			
Descriptor 3. Mercury phytoremediation																											
Preliminar	2	2	2	2	1	1	6	2	3	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	3	3	6	2	
Selección	1	1	1	1	1	1	3	0	1	2	0	1	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	2	4	0		
Descriptor 4. Mercury rhizoremediation																											
Preliminar	1	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	1	0	
Selección	0	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	1	0		

Con el uso de los descriptores y filtros adecuados se lograron identificar 97 reportes, asociados con el tema.

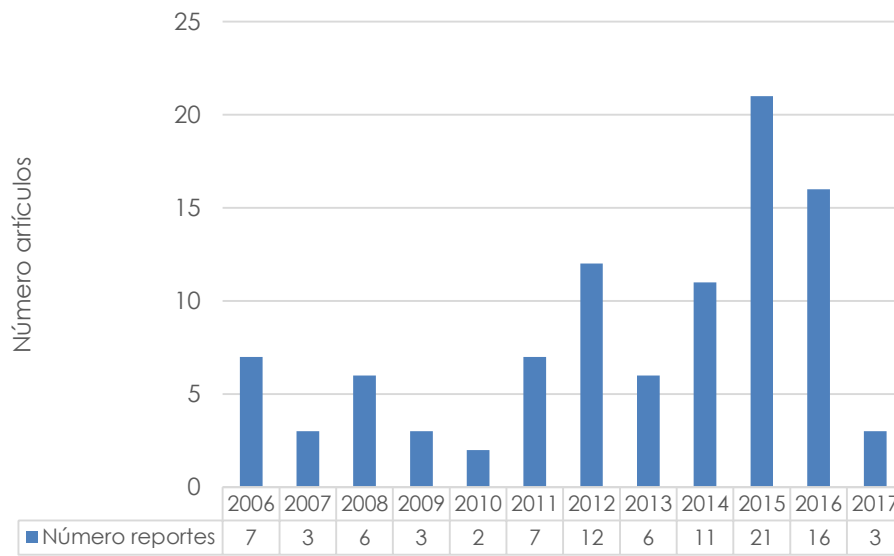


Figura 1. Distribución de reportes seleccionados con base en los descriptores los *mercury detoxification*, *biosorption of mercury*, *phytorremediation of mercury*, *rhizoremeditation of mercury* y filtros en las bases de datos *Science Direct* y *Springer* (2006-2017) (A enero 23 de 2017).

De los 97 reportes generados, siete se encontraron repetidos en los identificadores consultados, dando un valor neto de reportes de 90. Los cuales se utilizaron como muestra para realizar el análisis en esta monografía.

De los 90 reportes del estudio, 53 corresponden a trabajos realizados en degradación de mercurio específicamente por diferentes métodos y 37 son trabajos en remediación de metales pesados (incluido el mercurio). Adicionalmente de estos 90 reportes, 63 corresponden a estudios experimentales y 27 a revisiones de tema (Tablas 4 y 5).

Posteriormente los 90 reportes obtenidos se clasificaron de acuerdo con el tipo de tratamiento biológico evaluado, con el fin de ir identificando las tendencias en investigación a partir de la información obtenida:

- Biorremediación
- Bioadsorción
- Fitorremediación
- Rizorremediación
- Ficorremediación
- Selección de organismos con potencial para el tratamiento biológico de mercurio

En los documentos clasificados se realizó el análisis de los siguientes aspectos:

- Número de reportes anual, por tratamiento biológico.
- Número de reportes anual, por tipo de documento (artículo de investigación o de revisión de tema).
- Tratamiento biológico y distribución por país de origen de los autores.

Reporte anual de los estudios, de acuerdo con el tratamiento biológico.

En los 90 reportes, se aprecia un alto número de artículos en la temática de biorremediación concentrados en los años 2012, 2015 y 2016. La mayoría de los trabajos en bioadsorción se encuentran en 2006, 2014 y 2015, en fitorremediación en 2006, 2014 y 2015, en rizorremediación en 2012 y 2015 y en selección de organismos en los años 2012 y 2016 (Figura 2).

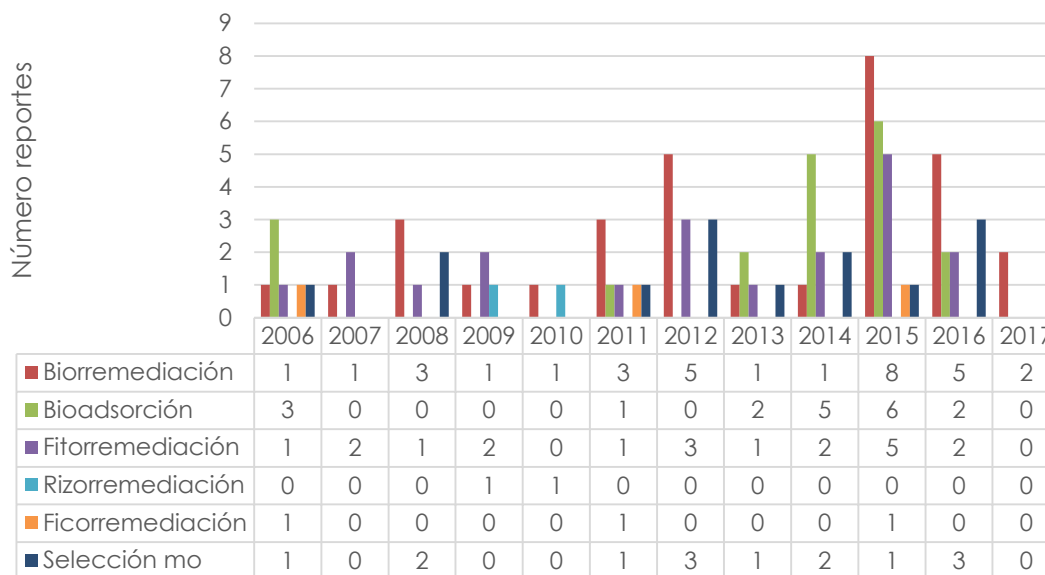


Figura 2. Distribución anual de los reportes de acuerdo con los tratamientos biológicos evaluados (A enero 23 de 2017).

Reporte anual por tipo de documento.

En estos trabajos se encontraron 63 artículos de investigación y 27 de revisión de tema, apreciándose un promedio de seis artículos de investigación por año en 2006, 2008 y 2011, con una mayor producción en 2015 (10 artículos). La mayoría de artículos de revisión de tema están en el 2015 (11 artículos (Figura 3).

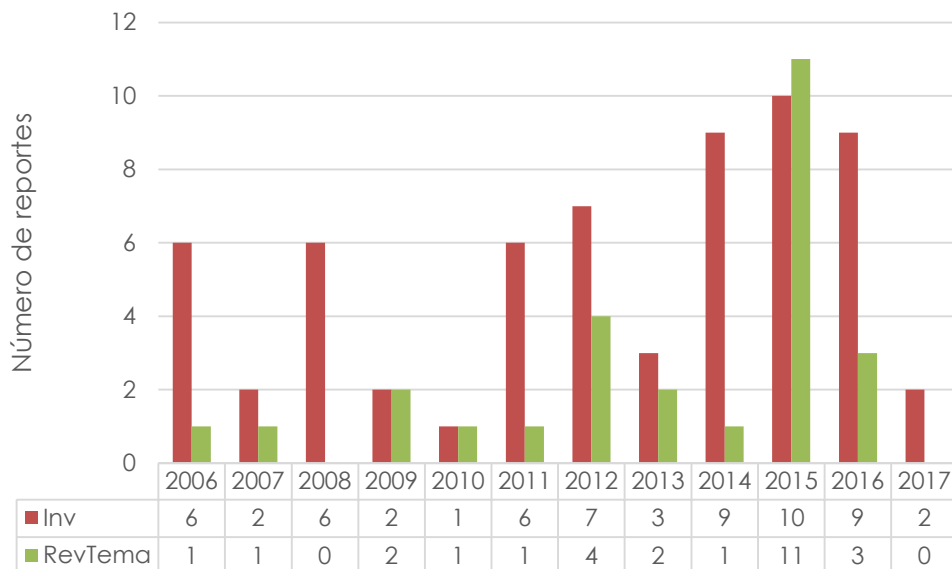
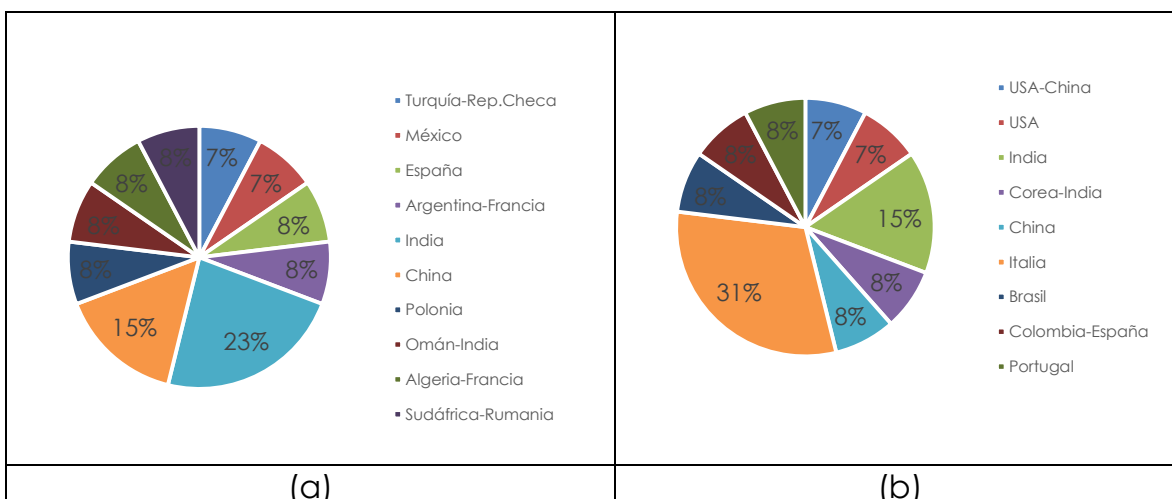


Figura 3. Distribución anual de los reportes, de acuerdo con el tipo de documento (artículos de investigación o de revisión de tema) (A enero 23 de 2017).

Distribución por país de acuerdo con la procedencia de los autores.

De acuerdo con este criterio los artículos de investigación, se distribuyeron de la siguiente manera: los reportes relacionados con el tratamiento de bioadsorción provienen en un 23% de la India (Figura 4a); en el tratamiento de fitorremediación el 31% de los estudios provienen de Italia (Figura 4b), en biorremediación el 25% de la India (Figura 4e), en ficorremediación el 67% de España (Figura 4d), y en rizorremediación el 100% de Kuwait. Con relación a la selección de microorganismos para la remediación de mercurio, los autores provienen de India, Italia e Indonesia con una representatividad del 15% cada uno (Figura 4c). De acuerdo con lo anterior, se puede evidenciar el liderazgo que tiene India e Italia en estos estudios.



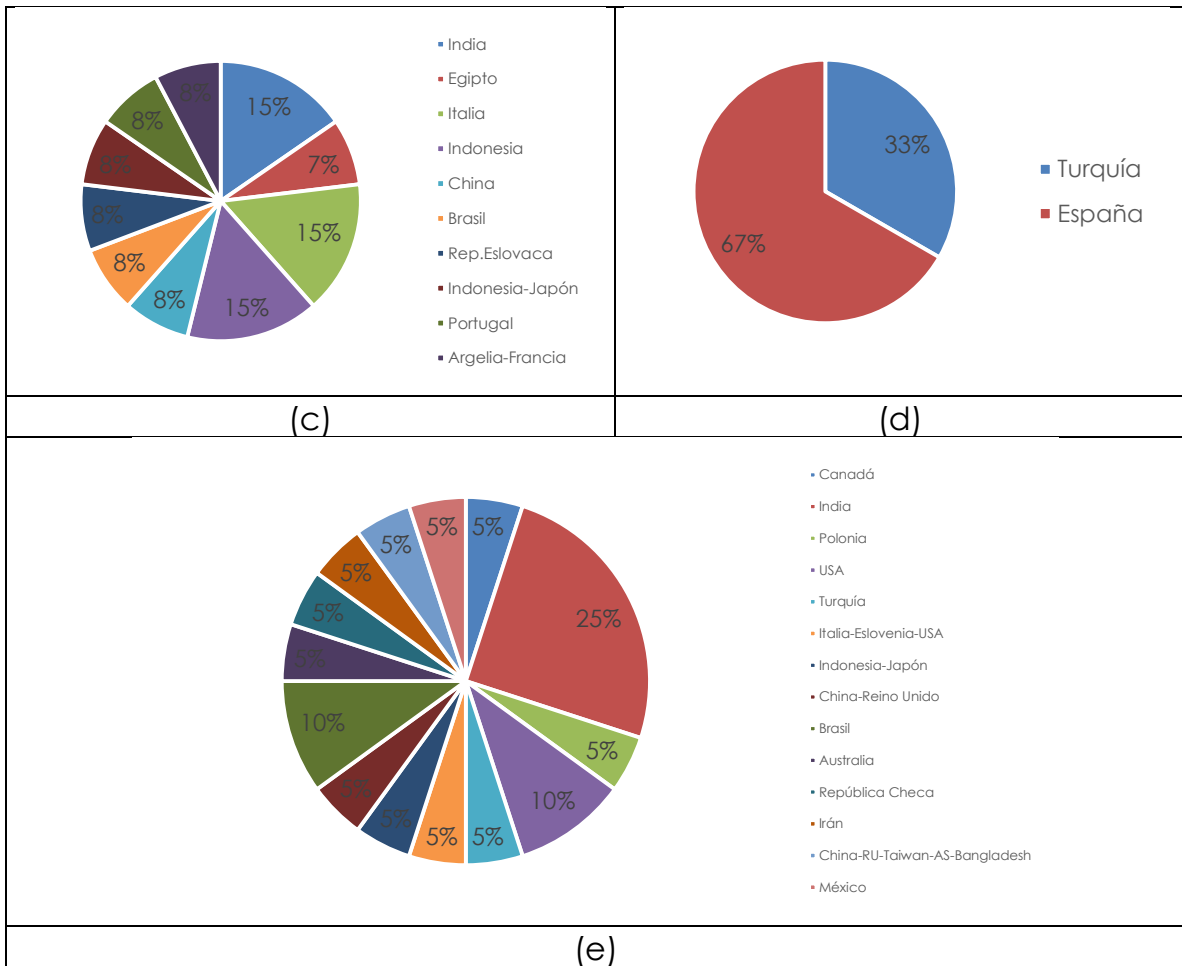


Figura 4. Distribución de la procedencia de los autores de los artículos de investigación, de acuerdo con el tratamiento evaluado. (a) Bioadsorción; (b) Fitorremediación; (c) Selección de microorganismos; (d) Fitorremediación; (e) Biorremediación.

En los artículos de revisión de tema se evidencia una tendencia similar, donde India es el país de origen de la mayoría de los reportes y sus autores. En el caso de bioadsorción el 50% provienen de este país (Figura 5a), lo mismo que para biorremediación (Figura 5c); en rizorremediación el 100% de los reportes son de la India y en fitorremediación el 29% provienen de China (Figura 5b).

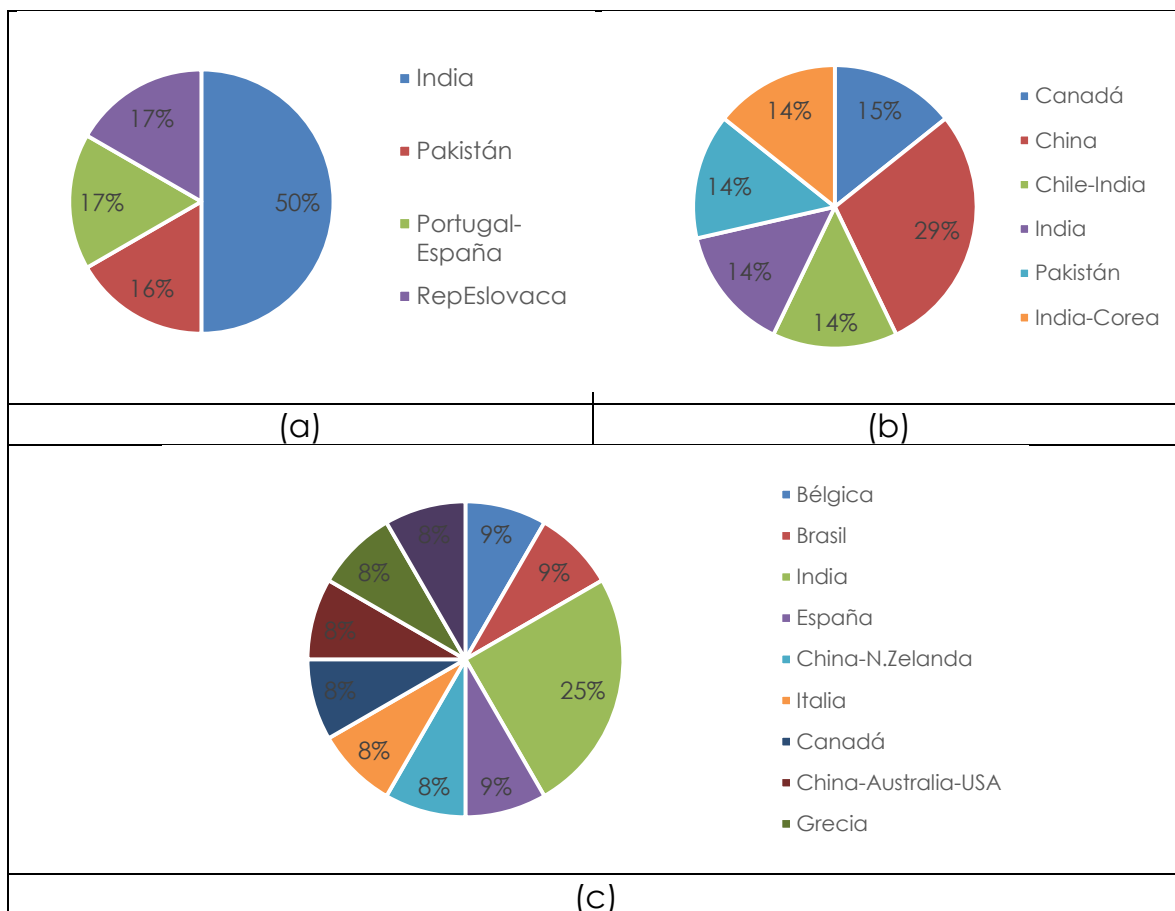


Figura 5. Distribución de la procedencia de los autores de los artículos de revisión de tema, de acuerdo con el tratamiento evaluado. (a) Bioadsorción; (b) Fitorremediación; (c) Biorremediación.

En los reportes analizados se evidencia colaboración entre países, lo cual es fundamental para apalancar las redes de investigación y el impacto de los resultados; en los 90 reportes se evidenció el 18,8% de trabajos con colaboración entre dos o tres países principalmente.

3.2 Aspectos clave a considerar en el tratamiento biológico de agua residual proveniente de la minería aurífera

Los 63 artículos de investigación fueron analizados y se identificaron las condiciones experimentales empleadas en cada estudio, el tipo de residuo evaluado, el organismo utilizado y la principal conclusión del trabajo (Tabla 4).

Con base en esta información, se proponen a continuación las condiciones experimentales, que se podrían considerar por el Grupo de Investigación GIDTA, en el diseño de experimentos que permitan evaluar la

degradación de mercurio en aguas residuales provenientes de la minería aurífera.

3.2.1. Tratamiento biológico: Fitorremediación

La planta macrófita acuática *Typha domingensis* ha demostrado tener potencial, en humedales con flujo subsuperficial, para la fitorremediación de aguas contaminadas con mercurio.

De acuerdo con el estudio realizado por Gomes, de Souza, Teles, & Araújo Méndez, (2014), el tejido vegetal de la planta aumentó con el tiempo de exposición, de acuerdo con una cinética de primer orden, con un parámetro de velocidad constante de aproximadamente 7 veces mayor que el tratamiento control. La especie tuvo un excelente rendimiento reduciendo en un $99,6 \pm 0,4\%$ la concentración de mercurio en agua contaminada. Comparada con otras especies, los resultados mostraron que *T. domingensis* tiene una mayor capacidad de acumulación de mercurio ($273.3515 \pm 0,7234$ mg/kg), obteniendo un coeficiente de transferencia de agua a planta de $7750,9864 \pm 569,5468$ L/kg.

El Grupo de Investigación GIDTA podría evaluar la utilización de la planta *T. domingensis*, puesto que la planta se ajusta satisfactoriamente al rango altitudinal para su desarrollo, de igual manera presenta un gran porcentaje de remoción en comparación con otras especies, demostrando una gran eficiencia en el porcentaje de remoción.

Son plantas resistentes a las condiciones de precipitación, temperatura, evaporación y vientos fuertes su sistema radicular y de hiperacomulación permiten el crecimiento de población microbiana suficiente, fortaleciendo de esta forma el tratamiento. Las ventajas que presenta esta especie según las revisiones realizadas permiten postularla, como una alternativa de investigación y desarrollo.

3.2.2. Tratamiento biológico: Ficorremediación

Los procesos de bioadsorción, constituyen una técnica eficaz para la eliminación del mercurio. En estudio realizado por Carro, Barriada, Herrero, & Sastre de Vicente, (2015), se estudiaron las propiedades de adsorción de la macroalga *Sargassum muticum* nativa y tratada con ácido. El efecto del pH: 6, la concentración inicial de mercurio y los estudios de tiempo de contacto proporcionaron información fundamental sobre el proceso de adsorción. Esta información se utilizó como valores de referencia para analizar la adsorción de mercurio en condiciones de competencia. El efecto salino mostró poca influencia en la adsorción, cuando sólo se produjeron modificaciones electrostáticas después de la adición de sal. Por el contrario, si la especiación del mercurio cambia radicalmente debido a

la adición de un electrolito, como en el caso de la sal de cloruro, se observan modificaciones muy grandes en la adsorción de mercurio. La competencia con otros cationes divalentes o compuestos orgánicos demostró poco o ningún efecto sobre el mercurio, lo que indica que se está produciendo un mecanismo diferente durante la eliminación de estos contaminantes.

De acuerdo con la alimentación de flujo continuo, Barriada, Herrero, & Sastre de Vicente, (2015), la macroalga nativa y protonada es un buen material para la eliminación del mercurio.

Al consumir baja energía, ser inodora, capturar dióxido de carbono y producir oxígeno, esta tecnología garantiza una limpieza efectiva de los efluentes sin afectar de manera negativa el medio ambiente, convirtiéndose en una solución innovadora a esta problemática. Por estas ventajas sería interesante aplicar esta biotecnología al interior del grupo GIDTA, de la Universidad Católica de Manizales.

3.2.3. Tratamiento biológico (Rizorremediación)

Sorkhoh, y otros, (2010) evaluaron los suelos rizosféricos de tres cultivos de leguminosos: habichuelas (*Vicia faba*), frijoles (*Phaseolus vulgaris*) y guisantes (*Pisum sativum*), y dos cultivos no legumbres como el pepino (*Cucumis sativus*) y tomate (*Lycopersicon esculentum*), para determinar la sinergia de bacterias con el potencial combinado, para la utilización de hidrocarburos y resistencia al mercurio. En el estudio se identificaron las bacterias asociadas a la rizosfera de las plantas, encontrándose principalmente *Citrobacter freundii*, *Enterobacter aerogenes*, *Exiguobacterium aurantiacum*, *Pseudomonas veronii*, *Micrococcus luteus*, *Brevibacillus brevis*, *Arthrobacter* sp. y *Flavobacterium psychrophilum*. Estas rizobacterias también eran diazotróficas, es decir, capaces de fijar N₂, lo que las hace autosuficientes en cuanto a su nutrición de nitrógeno y, por tanto agentes de remediación adecuados en suelos pobres en nitrógeno, tales como el suelo aceitoso desértico. Las plantas libres de rizobacterias eliminaron cantidades de mercurio de los medios circundantes, casi de manera equivalente a las eliminadas por los consorcios bacterianos rizósferos en ausencia de las plantas. Se evidenció que tanto las plantas colectoras como sus consorcios bacterianos rizosféricos, contribuyeron a la eliminación del mercurio del suelo.

Este tipo de asociación sería importante valorarla a través de un proyecto de investigación, que articule al Grupo GIDTA y al Grupo de Investigaciones Biológicas (GIBI) de la UCM, el cual cuenta dentro de su colección con bacterias diazótroficas, que podrían emplearse en la interacción planta-bacteria para la remoción de mercurio.

3.2.4. Tratamiento biológico (Biorremediación)

Aspergillus flavus cepa KRP1 recuperada de suelo de bosque tropical, fue evaluada para determinar su uso potencial en la degradación del mercurio en el suelo Kurniati, Arfarita, & Imai, (2014). Esta cepa demostró su capacidad para crecer en 25 ppm de mercurio, empleando el agar papa dextrosa. La respuesta al mercurio fue evaluada a través del diámetro de las colonias de los hongos estudiados, en comparación con el crecimiento obtenido en los medios de cultivo sin mercurio. La concentración inhibitoria mínima (CMI) de esta cepa de hongos al mercurio fue de 100 ppm (no hubo crecimiento en la placa del medio de cultivo), mientras que el crecimiento en medio no contaminado alcanzó el máximo a los 5 días de incubación. La cepa fúngica también fue evaluada *in vitro* para determinar su uso potencial en procesos de biorremediación de suelos contaminados por mercurio, a través de la observación del perfil de crecimiento y la concentración de mercurio en el medio de cultivo. Los perfiles de crecimiento de *Aspergillus flavus* cepa KRP1 mostraron un crecimiento considerable, en el medio de cultivo que contenía mercurio. Este resultado fue apoyado por la disminución de la concentración de mercurio, lo cual indicó un proceso de utilización de este metal, a través de un mecanismo de degradación. Esto indica que esta cepa de hongos tiene un uso potencial para áreas donde existe contaminante de mercurio.

Se propone diseñar un experimento en condiciones similares, con un hongo nativo de la zona o con uno disponible en la colección de microorganismos de la UCM, afín de valorar su potencial y evaluar la degradación del metal en condiciones *in vitro* y en campo a largo plazo.

Tabla 4. Relación de artículos resultado de investigación, de acuerdo con el tratamiento empleado.

Tratamiento biológico: Bioadsorción									
Tipo de artículos: Resultado de Investigación									
N.	Autor/Año	Título	Revista	Base de datos	País	Sustrato	Condiciones experimentales	Organismo o biomasa	Conclusiones
1	Yavuz, Denizli, Güngöres, Safarikova, & Safarik, (2006)	Biosorption of mercury on magnetically modified yeast cells	Separation and Purification Technology	Science Direct	Turquía República Checa	Aguas residuales industriales	<p>pH:5</p> <p>80% de biosorción en 60 minutos.</p> <p>El equilibrio se logró alrededor de 90 minutos.</p> <p>Se obtuvo una capacidad máxima de biosorción de Hg²⁺ de 114,6 mg/g a 35°C.</p> <p>Las capacidades de biosorción fueron:</p> <p>29,9 mg/g para Cu²⁺</p> <p>76,2 mg/g para Hg²⁺</p> <p>14,1 mg/g para Ni²⁺</p> <p>11,8 mg/g para Zn²⁺</p>	Células de levadura de cerveza (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> subsp. <i>uvarum</i>)	<p>Se usaron células de levadura modificadas magnéticamente para la biosorción/desorción de iones Hg²⁺ a partir de soluciones sintéticas.</p> <p>Se observaron altas tasas de biosorción al comienzo del proceso de biosorción, y luego los valores de meseta (es decir, el equilibrio de biosorción) se alcanzaron gradualmente en aproximadamente 90 minutos.</p> <p>Las cantidades de biosorción de iones Hg²⁺ aumentaron a medida que incrementó el pH, alcanzando un valor de meseta de pH 5,0.</p> <p>A partir de los resultados presentados en este trabajo se</p>

									puede concluir que las células de levadura magnéticamente modificadas pueden utilizarse eficazmente con altas tasas de biosorción para la eliminación específica de iones Hg^{2+} a partir de soluciones acuosas incluyendo aguas residuales.
2	Green-Ruiz, (2006)	Mercury (II) removal from aqueous solutions by nonviable <i>Bacillus</i> sp. from a tropical estuary	Bioresource Technology	Science Direct	México	Soluciones acuosas	<p>pH: 6,0 para concentraciones de mercurio bajas (entre 1 y 5 mg/L).</p> <p>A 25 °C con soluciones de 1,0, 5,0 y 10,0 mg/L de Hg (II).</p> <p>Tiempos: 0, 20, 40, 60, 90 y 120 min, para tres diferentes concentraciones iniciales de Hg (II).</p>	<i>Bacillus</i> sp.	<p>Los resultados de este estudio confirman que el <i>Bacillus</i> sp., proveniente de un estuario es un biosorbente adecuado para los iones Hg (II). En términos de porcentaje de mercurio biosorbido, este fue más eficiente a concentraciones menores de Hg (<100 mg/L).</p> <p>Además, los valores de pH de las soluciones experimentales afectaron la capacidad de biosorción del Hg (II), con resultados a un pH entre 4,5 y 6.</p>
3	Tajes-Martínez,	Micro-columns	Talanta	Science	España	Aguas	pH> 3	<i>Chlorella vulgaris</i>	El estudio mostró

	Beceiro-González, Muniategui-Lorenzo, & D., (2006)	packed with <i>Chlorella vulgaris</i> immobilized on silica gel for mercury speciation		Direct		contaminadas	<p>% de remoción del 97%</p> <p>Los cultivos de biomasa se cultivaron en un acuario de vidrio</p> <p>Botellas de 1 L, con flujo de aire de 10 L/h, a una temperatura constante de 22 °C y los cultivos se iluminaron durante 12 h por cada día.</p> <p>Se lavó gel de sílice (0,2 g) dos veces con 10 mL de HCl 0,2N durante 10 min con agitación continua.</p> <p>Se centrifugaron 20 mL de <i>C. vulgaris</i> (2 mg de peso seco) a 2000 x g durante 5 min.</p>		<p>que la utilización de <i>C. vulgaris</i> inmovilizada sobre sílica gel permitió la retención de metilmercurio (CH_3Hg^+) y de mercurio (II) (Hg^{2+}), además de la determinación y extracción secuencial del mercurio en las muestras de agua.</p> <p>Por lo tanto, el método descrito proporciona una manera simple y económica para la especiación del mercurio.</p> <p>Una desventaja del procedimiento es que requiere de volúmenes de extracción para eliminar cuantitativamente los dimetilmercurio ($(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$).</p>
4	Plaza, Viera, Donati, & Guibal, (2011)	Biosorption of mercury by <i>Macrocystis pyrifera</i> and <i>Undaria pinnatifida</i> : Influence of zinc, cadmium and nickel	<i>Journal of Environmental Sciences</i>	Science Direct	Argentina Francia	Aguas y suelos contaminados	<p>Concentración inicial de 50 mg/L</p> <p>Se controló el pH a diferentes valores iniciales (es decir, 3,0; 4,0; 5,0 y 6,0). La absorción óptima se alcanzó a pH:6</p> <p>Se agitaron a 200 rpm a 20°C.</p>	<i>Macrocystis pyrifera</i> y <i>Undaria pinnatifida</i>	La sorción de Hg (II) fue significativamente afectada por la presencia de Zn (II), Cd (II) y Ni (II), como reducción de la captación de mercurio hasta diez veces para <i>U. pinnatifida</i> y menos de cuatro veces para <i>M. pyrifera</i> .

							<p>Las muestras se recogieron y filtraron a diferentes intervalos de tiempo durante 72 h.</p> <p>Se prepararon soluciones binarias de Hg (II)-Zn (II), Hg (II)-Cd (II), Hg (II)-Ni (II) a pH 5,0.</p> <p>La concentración final de cada metal fue de 0,25 mmol/L.</p>		<p>La variación del pH durante los experimentos de adsorción dependió del biosorbente:</p> <p>El pH aumentó en el caso de <i>M. pyrifera</i> y disminuyó en el caso de <i>U. pinnatifida</i> tanto en soluciones monocomponentes como en soluciones de componentes binarios.</p>
5	Mondal, Nandi, & Purkait, (2013)	<i>Removal of mercury (II) from aqueous solution using bamboo leaf powder: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies</i>	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	<i>Science Direct</i>	India	Solución acuosa	<p>pH: 8</p> <p>Máxima adsorción 80%</p> <p>Mínima adsorción 65%</p> <p>Tiempo de adsorción 50 – 60 minutos.</p> <p>Se preparó una solución de Hg (II) (1000 mg/L) disolviendo 1,354 g de HgCl₂ en 700 mL de agua destilada.</p> <p>Se filtró sin lavado adicional con agua destilada y después se secó durante 24 horas</p>	<p>Polvo de hoja de bambú no modificada (BLP)</p> <p>Polvo de hoja de bambú modificado mediante el uso de tensioactivo aniónico SDS (BLPS) y del agente tensioactivo no iónico Triton X-100 (BLPT)</p>	<p>En el presente estudio se encontró que en el rango de temperatura entre 293 y 307 °K, la capacidad de adsorción del mercurio (II) aumentó ligeramente (2-3%) con el incremento de la temperatura.</p>

6	Wang & Sun, (2013)	<i>Biosorption of heavy metals from aqueous solution by UV-mutant Bacillus subtilis</i>	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	Springer	China	Solución acuosa	<p>bajo luz solar.</p> <p>pH: 5</p> <p>Tiempo: después de 60 minutos para Pb y Hg, 5 h para Cd.</p> <p>Efectos de la Temperatura y la fuerza iónica: despreciables.</p>	<i>Bacillus subtilis</i> (B38)	<p>Se encontró que el valor de pH tuvo un fuerte efecto sobre la biosorción, pero los efectos de la temperatura fueron mínimos.</p> <p>Los efectos de la fuerza iónica sobre la biosorción del catión Cd y el anión Cr fueron insignificantes. Sin embargo, para Hg y Pb, donde la unión electrostática contribuyó mucho a la adsorción global, la capacidad de captación disminuyó con el aumento de la fuerza de la carga iónica.</p>
7	Zawadzki, Sokołowska, Kolon, Anna, & Kempers, (2014)	<i>Mercury in Pleurozium schreberi and Polytrichum commune from areas with various levels of Hg pollution – an accumulation and desorption experiment with microscopic observations</i>	<i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>	<i>Science Direct</i>	Polonia	Suelos contaminados	<p>Porcentaje de remoción 10-21%</p> <p>Tiempo de exposición al mercurio 16 días</p>	<p>Musgos terrestres de diferentes formas de vida:</p> <p><i>Polytrichum commune</i> (ortotrópico y endohídrico)</p> <p><i>Pleurozium schreberi</i> (plagiotrófico y ectohídrico)</p>	<p>Se encontró que después de 64 días de cultivo en ausencia de Hg, <i>P. schreberi</i> remedió solamente entre el 10-14% del Hg inicialmente acumulado, mientras que <i>P. commune</i> removió entre el 10-21%.</p>
8	Rajamohan, Manivasagan, & Dilipkumar, (2014)	<i>Parametric and kinetic studies on biosorption of mercury using</i>	Journal of the Taiwan Institute of Chemical	<i>Science Direct</i>	Sultanato de Omán India	Suelos contaminados	<p>pH óptimo: 7,0</p> <p>Dosis sorbente: 3,0 g/L</p>	<i>Phoenix dactylifera</i>	<p>Se realizaron estudios para la eliminación de Hg (II), utilizando</p>

		<i>modified Phoenix dactylifera biomass</i>	Engineers				<p>Eficiencia de eliminación 92%</p> <p>Tiempo de eliminación: 180 minutos.</p> <p>Proceso de sorción: endotérmico.</p> <p>Temperatura entre 298 - 318 °K</p> <p>Velocidad óptima de agitación 300 rpm</p>		<p>palmito protonado como adsorbente, obteniéndose una alta eficiencia de remoción del contaminante.</p> <p>Los experimentos fueron muy sensibles a la variación del pH.</p>
9	Allouchea, Guibal, & Mameri, (2014)	<i>Preparation of a new chitosan-based material and Its application for mercury sorption</i>	<i>Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects</i>	<i>Science Direct</i>	Argelina Francia	Aguas contaminadas	<p>pH: 4,0</p> <p>Temperatura 20 – 24 °C</p> <p>pH: 6,0</p> <p>Concentración inicial de metal: varió entre 10 y 200 mg Hg/L</p> <p>Cilindro: 10 mm de altura y 10 mm de diámetro</p>	Quitosano	<p>Los resultados de las columnas indican que el quitosano acondicionado bajo la forma de espuma cilíndrica se considera un material alentador en las pruebas de laboratorio, en perspectiva de la aplicación industrial, en comparación con otros biosorbentados.</p> <p>La capacidad de sorción del mercurio en la espuma cilíndrica alcanzó 350 mg de Hg/g, mientras que para el quitosano (G2) aumentó hasta 850 mg de Hg</p>

									g/1at en un sistema de lotes. Los resultados encontrados en la literatura concluyeron que el quitosano se solubiliza completamente, por debajo de ~ pH 5 o 6.
10	Bakatula, y otros, (2014)	<i>Biosorption of trace elements from aqueous systems in gold mining sites by the filamentous green algae (Oedogonium sp.)</i>	<i>Journal of Geochemical Exploration</i>	<i>Science Direct</i>	Sudáfrica Rumania	Aguas contaminadas Agua desionizada y liofilización	pH: 5 Tiempo de contacto 30 minutos Máxima adsorción 99% Los experimentos se realizaron en 250 mL de polipropileno En 1 g de la biomasa en cada matraz Se añadió una solución de metal pesado (100 mg/L) El pH inicial: 2-7 La mezcla se agitó durante 12 h a temperatura ambiente a 150 rpm	Algas verde filamentosa (<i>Oedogonium sp.</i>)	La reutilización de la biomasa de algas mostró muy buenas capacidades de adsorción. La capacidad de biosorción de la biomasa de algas se incrementó en un sistema multi-ion. La absorción óptima de Cr, Cu y Ni se alcanzó a pH entre 2 y 5. La biomasa de algas crece naturalmente en las cercanías de las instalaciones de colas y sistemas de agua, haciendo posible y rentable cultivarla <i>in situ</i> y permitir la limpieza del agua contaminada.
11	Gupta, Vidyarthib, &	<i>Thiol functionalized</i>	<i>Journal of Environmen</i>	<i>Science Direct</i>	India	Corrientes de agua	Cinética de adsorción y	Bagazo de caña de azúcar	La capacidad de adsorción de SCB-S

	Sankararamakrishnan, (2014)	sugarcane bagasse – A low cost adsorbent for mercury remediation from compact fluorescent bulbs and contaminated water streams	Journal of Chemical Engineering			contaminada	equilibrio 120 minutos pH: 6,0 Altura de lecho de 10 cm. Caudal de 1 mL /min, 840 y 527 mL de agua endurecida con Hg (II) en experimentos de columna usando SCB-S y SCB respectivamente, reduciendo las concentraciones de Hg (II) de 5,0 a 0,1 mg/L.	funcionalizado con tiol	(192,31 mg/g) fue mayor que el SCB virgen (44,36 mg/g). Mayor capacidad de SCB-S, la eliminación del mercurio podría atribuirse a la unión covalente entre el grupo tiol y los iones mercurio
12	Dash & Das, (2015)	Bioremediation of inorganic mercury through volatilization and biosorption by transgenic <i>Bacillus cereus</i> BW-03 (p PW-05)	International Biodeterioration & Biodegradation	Science Direct	India	Suelos contaminados	Capacidad de biosorción: 99%	<i>Bacillus cereus</i> BW-03 (p PW-05)	Se demostró el potencial de aplicación de esta bacteria transgénica para la biorremediación <i>in situ</i> de Hg en un experimento de microcosmos, donde se retiró el 96,4% de mercurio inorgánico, sinérgicamente con la microbiota normal.
13	Huang & Lin, (2015)	Biosorption of Hg(II) and Cu(II) by biomass of dried <i>Sargassum fusiforme</i> in aquatic solution	Journal of Environmental Health Science & Engineering	Science Direct	China	Solución acuática	Tiempo de contacto 60 minutos. pH: 8,0	Biomasa seca de <i>Sargassum fusiforme</i>	El pasto marino adsorbió una cantidad apreciable de mercurio y cobre a partir de las soluciones acuáticas, a los 60

									<p>mina bajas concentraciones de equilibrio.</p> <p>La adsorción específica tanto de Hg (II) y Cu (II) aumentó a baja concentración, mientras que disminuyó cuando la concentración de biomasa superó los 2,0 g / L.</p>
Tratamiento biológico: Fitorremediación									
Tipo de artículos: Resultado de Investigación									
N.	Autor/Año	Título	Revista	Base de datos	País	Sustrato	Condiciones experimentales	Organismo o biomasa	Conclusiones
14	Crakó, Feng, He, Liang, & Márton, (2006)	Transgenic <i>Spartina alterniflora</i> for phytoremediation	<i>Environmental Geochemistry and Health</i>	Springer	USA – China	Plantas genéticamente modificadas	<p>pH: 5,0</p> <p>Temperatura 109°C</p> <p>25 min</p>	<i>Spartina alterniflora</i>	La modificación genética de pastos forman monocultivos que son buenos remediadores naturales de contaminantes. Su mejora genética es una tarea importante porque la introducción de transgenes puede mejorar dramáticamente su potencial remediación.
15	Skinner, Wright, & Porter-Goff, (2007)	<i>Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plants</i>	<i>Environmental Pollution</i>	<i>Science Direct</i>	USA	Aguas contaminadas	<p>pH: 7,2</p> <p>Se utilizaron tanques de vidrio por duplicado, de 40 L, para cada especie de planta</p> <p>Concentraciones de 0 mg/L; 0,5</p>	<p><i>Eichornia crassipes</i></p> <p><i>Pistia stratiotes</i></p> <p><i>Scirpus tabernaemontani</i></p> <p><i>Colocasia esculenta</i></p>	El estudio indicó que todas las especies de plantas redujeron las concentraciones de mercurio en el agua a través de la absorción de este.

							mg/L y 2 mg/L de mercurio 22 °C durante 30 días		La lechuga de agua y jacinto de agua demostraron la mayor eficiencia.
16	Mishra, Rani, Vinita Pathak, & Tripathi, (2008)	Phytoremediation of mercury and arsenic from tropical opencast coalmine effluent through naturally occurring aquatic macrophytes	Water, Air, and Soil Pollution	Springer	India	Aguas contaminadas	Duración de las pruebas 21 días Las plantas se cultivaron en acuarios de vidrio de 150 L de capacidad (100 × 50 × 30 cm) Los tejidos de las plantas se secaron al horno a 80°C Remoción: 71% y 80% de Hg y As, respectivamente	<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Lemna minor</i> y <i>Polyrrhiza spirodela</i>	Las correlaciones entre la eliminación de arsénico y mercurio de los efluentes de minería y su aumento en partes de la planta fueron muy significativas. Los resultados de remoción hechas por las especies son muy prometedores.
17	Mishra, Tripathi, & Kim, (2009)	Removal and accumulation of mercury by aquatic macrophytes from an open cast coal mine effluent	Journal of Hazardous Materials	Science Direct	República de Corea e India	Macrófitas acuáticas	Porcentaje de remoción 68 al 80% Tiempo de exposición 21 días Temperatura 30°C pH 9,0	<i>Pistia stratiotes</i> y <i>Azolla pinnata</i>	Con la utilización de estos macrófitos acuáticos se encontró que tienen un gran potencial para restringir el paso de los efluentes de Hg a otros reservorios ambientales. De las dos plantas estudiadas, <i>P. stratiotes</i> mostró tener un factor de transposición mejorado con respecto al otro. Sin embargo, las especies de plantas pueden utilizarse

									para la extracción en gran escala de Hg de aguas residuales.
18	Rai & Tripathi, (2009)	Comparative assessment of <i>Azolla pinnata</i> and <i>Vallisneria spiralis</i> in Hg removal from G.B. Pant Sagar of Singrauli Industrial region, India	Environmental Monitoring and Assessment	Springer	India	Pantano aguas residuales	<p>Tiempo del experimento 6 días</p> <p>Temperatura 22°C</p> <p>% eliminación de Hg fue mayor para <i>A. pinnata</i> (80-94%) que <i>V. spiralis</i> (70-84%) con una alta correlación ($R^2 = 0,91$ para <i>A. pinnata</i> y $0,99$ para <i>V. spiralis</i>)</p>	<p><i>Azolla pinnata</i></p> <p><i>Vallisneria spiralis</i></p>	<p>La disminución del contaminante fue más prominente en <i>Azolla</i>.</p> <p>Los resultados recomendaron el uso de <i>A. pinnata</i> y <i>V. spiralis</i> para mejorar los efluentes industriales (energía térmica, de cloro-álcali y la mina de carbón de efluentes) contaminado con Hg</p>
19	Wang, y otros, (2011)	Ammonium thiosulphate enhanced phytoextraction from mercury contaminated soil – Results from a greenhouse study	Journal of Hazardous Materials	Science Direct	China	Suelo contaminado con mercurio	<p>pH: 7,0</p> <p>Una sub-muestra de suelo homogenizada (2,5 kg) fue distribuida en 12 macetas de plástico.</p> <p>Temperatura media diurna de 25-30 °C y humedad de 40-60%.</p> <p>Volumen de tratamiento de 200 mL de solución</p>	<i>Chenopodium glaucum</i> L.	<p>Los datos presentados en este trabajo sugieren que el tiosulfato de amonio aumenta la solubilidad de THg y de este modo, la absorción de mercurio por las plantas.</p> <p>El contenido de THg se redujo en el suelo al final del experimento con relación a la concentración inicial.</p> <p>Además, se encontró que la fitoextracción</p>

									asistida con el tiosulfato se puede utilizar para reducir el riesgo ambiental del suelo contaminado con mercurio a través de la reducción de las fracciones de óxido de atado.
20	Cassina y otros (2012)	Using a plant hormone and a thioligand to improve phyto remediation of Hg-contaminated soil from a petrochemical plant	Journal of Hazardous Materials	Science Direct	Italia	Fitohormona: citoquinina (tratamiento foliar CK), y tiosulfato de amonio (TS, aplicación al suelo)	pH: 8,0 Se recogieron 12 submuestras de suelo de aproximadamente 1 kg cada una en un área de 1000 m ² Las concentraciones de P y K disponibles (mg/kg) fueron 11,3 y 193 respectivamente	Brassica juncea (mostaza de la India) y Helianthus annuus (girasol)	La combinación de citoquinina y tiosulfato de amonio mostró efectos sinérgicos sobre la fitoextracción de Hg. La fracción Hg lábil en el suelo se eliminó significativamente por Brassica juncea y Helianthus annuus.
21	Gomes, de Souza, Teles, & Araújo Méndez, (2014)	Phytoremediation of water contaminated with mercury using Typha domingensis in constructed wetland	Chemosphere	Science Direct	Brasil	Construcción de un humedal	Porcentaje de remoción: 99% de Hg Temperatura: 18 – 30 °C. Tiempo del proceso: 21 días	Typha domingensis	Al comparar los resultados encontrados con otras especies, los resultados mostraron que T. domingensis tiene una mayor capacidad de acumulación de mercurio (273.3515 ± 0,7234 mg kg ⁻¹ leq l). Estos resultados muestran un alto potencial de la

									macrófita acuática estudiada.
22	Marrugo-Negrete, Durango, Pinedo, Olivero, & Díez, (2015)	Phytoremediation of mercury-contaminated soils by <i>Jatropha curcas</i>	Chemosphere	Science Direct	Colombia España	Suelos contaminados	<p>Los tratamientos experimentales consistieron en cuatro niveles de concentraciones de mercurio en el suelo - T0, T1, T5, y T10 (0, 1, 5, y 10 g de Hg por g de suelo, respectivamente)</p> <p>Tiempo de exposición: 4 meses</p> <p>Temperatura: 27 – 30°C</p> <p>Humedad relativa: entre 55 y 65%</p>	<i>Jatropha curcas</i>	<p>La reducción máxima de la biomasa (16,3%) se produjo para T10 (10 mg Hg/g).</p> <p>Las especies de <i>J. curcas</i> mostraron altos y bajos FBC TFS, y su uso podría ser un enfoque prometedor para la remediación de suelos contaminados con mercurio.</p>
23	Concas, Lattanzi, Bacchetta, Barbafieri, & Vacca, (2015)	Zn, Pb and Hg contents of <i>Pistacia lentiscus</i> L. grown on heavy metal-rich soils: implications for phytostabilization	Water, Air, & Soil Pollution	Springer	Italia	Suelos contaminados	<p>Rango de pH 7,0 – 8,0</p> <p>Edad de las plantas utilizadas entre 3 a 4 años.</p> <p>Cada planta se dividió en raíces, tallos y hojas y lavado con agua desionizada y finalmente con Milli-Q de agua. Después del lavado, las muestras de la planta fueron secadas en estufa a 60 °C durante 3 semanas y luego</p>	<i>Pistacia lentiscus</i> L.	<p>Los órganos mostraron una relación aproximada con el contenido del suelo; por lo tanto, esta planta tiene carácter de ser un indicador.</p> <p><i>P. lentiscus</i> es muy adecuado para las acciones de revegetación y podría disminuir la movilidad del metal mediante la estrategia de estabilización del suelo.</p>

							molido utilizando una amoladora eléctrica de acero Retsch.		
23	Swapna, Salim, Chandra, & Puthur, (2015)	Structural changes in response to bioaccumulation of iron and mercury in <i>Chromolaena odorata</i> (L.) King & Robins.	Environmental Monitoring and Assessment	Springer	India	Suelos contaminados	PH: 7 Durante 10 min Los especímenes fueron recubiertos con oro y fotomicrografías	<i>Chromolaena odorata</i> .	Los valores de FBC estuvieron siempre por debajo de 1 y el potencial de fitorremediación no se pudo evaluar en este contexto dado que estos resultados son de experimentos simulados, y carecen de repetidos ensayos de campo. Sin embargo, los datos del presente estudio proporcionan una amplia evidencia para el patrón de absorción, translocación, bioacumulación así como la recuperación de Fe y Hg y la morfología resultante.
24	Cozzolino, y otros, (2016)	Plant tolerance to mercury in a contaminated soil is enhanced by the combined effects of humic matter addition and inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi	Environmental Science and Pollution Research	Springer	Italia	<i>Rhizophagus irregularis</i> y <i>Funneliformis mosseae</i>	pH 7 Temperatura 15 – 28°C	<i>Lactuca sativa</i> L	Los efectos sinérgicos de estos dos tratamientos del suelo constituyen una herramienta promoviendo el crecimiento de una planta sensible como la lechuga. En un suelo contaminado con

25	Fidalgo, Henriques, Rocha, Tacão, & Alves, (2016)	Culturable endophytic bacteria from the salt marsh plant <i>Halimione portulacoides</i> : phylogenetic diversity, functional characterization, and influence of metal(loid) contamination	Environmental Science and Pollution Research	Springer	Portugal	Aguas contaminadas	Se procesaron once plantas en el laboratorio: cinco del sitio C, tres del sitio B y tres del sitio E. Durante 10 min incubación a 28 °C durante 72 h. PH:7,0	Bacterias endofíticas de <i>H. portulacoides</i>	Hg. Los resultados sugieren que la endosfera de <i>H. portulacoides</i> representa un punto de acceso bacteriana a diversas especies incluyendo nuevas putativas. Muchas cepas aisladas, en particular los afiliados a <i>Altererythrobacter</i> , <i>Marinilactibacillus</i> , <i>Microbacterium</i> , y <i>Vibrio</i> , dieron positivo para las actividades enzimáticas y promotores del crecimiento de plantas, exponiendo <i>H. portulacoides</i> como una fuente de bacterias y compuestos con aplicaciones biotecnológicas
Tratamiento biológico: Selección de organismos con potencial para el tratamiento biológico de mercurio									
Tipo de artículos: Resultado de Investigación									
N.	Autor/Año	Título	Revista	Base de datos	País	Sustrato	Condiciones experimentales	Organismo o biomasa	Conclusiones
26	Ramaiah, Jaysankar, & Vardanyan, (2008)	Characterization of marine bacteria highly resistant to mercury exhibiting multiple	Ecological Indicators	Science Direct	India	Agar nutritivo de agua de mar	Temperatura 28°C Duración del proceso 120 minutos	<i>Pseudomonas</i> , <i>Alcaligenes</i> , <i>Brevibacterium</i> and <i>Bacillus</i>	Se encontró que estos aislamientos comprenden un conjunto valioso para el ensayo de cepas que degradan

		resistances to toxic chemicals							contaminantes en presencia de altas concentraciones de mercurio, que pueden utilizarse en la biorremediación de desechos mixtos.
27	Abdel Rahman, Abou Shanab, & Moawad, (2008)	Mercury detoxification using genetic engineered <i>Nicotiana tabacum</i>	Global NEST Journal	Science Direct	Egipto	Suelos contaminados con mercurio.	Desnaturalización a 95 ° C durante 1 min, recocado a 45 ° C durante 1 min. Extendiéndose a 72 ° C durante 1 min. Construcción de plantas transgénicas de tabaco incubadas durante 3-4 semanas a 24 ° C en una cámara de crecimiento. Las plántulas se cultivaron a 24 ° C con un régimen de 16 h de luz / 8 h de oscuridad y Fotografiado a las 4-6 semanas.	Nicotiana tabacum	Los resultados mostraron una clara evidencia de que las plantas transgénicas son resistentes a ambos compuestos de mercurio orgánicos e inorgánicos y pueden ser utilizados para limpiar sitios contaminados con mercurio.
28	Pepi, y otros, (2011)	Mercury-resistant bacterial strains <i>Pseudomonas</i> and <i>Psychrobacter</i> spp. isolated from sediments of Orbetello Lagoon (Italy) and their possible use in	International Biodeterioration & Biodegradation	Science Direct	Italia	Suelos contaminados.	Se almacenaron a 80°C. En 30% de glicerol estéril.	<i>Pseudomonas</i> y <i>Psychrobacter</i> spp.	En este trabajo la remoción de mercurio fue 99% eficiente en la presencia de un medio de cultivo más mercurio, y un 96% eficiente cuando el lixiviado Se añadieron soluciones.

		bioremediation processes							
29	Irawati, Patricia , Soraya, & Baskoro , (2012)	A study on mercury-resistant bacteria isolated from a gold mine in Pongkor Village, Bogor, Indonesia	HAYATI Journal of Biosciences	Science Direct	Indonesia	Aguas residuales.	<p>Brevundimonas sp. HgP1 acumuló Hg2 + hasta 1,09 y 2,7 mg / g de peso seco de células y eliminó 64,38 y 57,10% de Hg2 + del medio que contenía 50 y 100 ppm de HgCl2, respectivamente.</p> <p>Las células se hicieron crecer en 25 ml de medio LB que contenía 50 y 100 ppm de HgCl2 y se recogieron por centrifugación a 4.000 rpm durante 15 minutos.</p>	Brevundimonas sp. HgP1 y Brevundimonas sp. HgP2	<p>Las bacterias resistentes al mercurio se consideran ahora un enfoque potencial para la remediación biológica.</p> <p>Se han desarrollado estrategias de biorremediación, incluyendo biotransformación, biosorción y bioprecipitación de mercuriales, pero rara vez se han aplicado a la remediación de mercuriales en el medio ambiente</p>
30	Puglisi, y otros, (2012)	Identification of differentially expressed genes in response to mercury I and II stress in <i>Trichoderma harzianum</i>	Gene	Science Direct	Italia	Medios acuosos	<p>La cepa se mantuvo a 25 ± 1 °C en papa</p> <p>Durante 7 días</p> <p>Medio suplementado con 0,1 ppm de metales pesados</p> <p>Temperatura 85 °C</p>	<i>Trichoderma harzianum</i>	Se encontró que la hidrofobina, tiene una alta capacidad para disolver moléculas hidrófobas en medios acuosos.
31	Deng & Wang, (2012)	Isolation of marine bacteria highly resistant to mercury and their bioaccumulation process	Bioresource Technology	Science Direct	China	Aguas contaminadas	<p>pH: 10</p> <p>Una bacteria marina, la tensión S1, que exhibe una tolerancia Hg máximo de 120 mg L⁻¹ y una</p>	Streptomyces sp	Para el efecto de los cationes coexistentes sobre la bioacumulación de metal objetivo, se encontró que el efecto dependía no sólo de la

							capacidad máxima absorción de Hg de 133 mg g ⁻¹		variedad y de la concentración inicial de iones coexistentes, sino también la concentración inicial de metal objetivo y la dosis de biomasa.
32	Cabral, y otros, (2013)	Isolation and characterization of bacteria from mercury contaminated sites in Rio Grande do Sul, Brazil, and assessment of methylmercury removal capability of a <i>Pseudomonas putida</i> V1 strain	Biodegradación	Springer	Brasil	Aguas contaminadas.	Porcentaje de remoción 77% pH 4-6 Temperatura 21 – 25°C	<i>Pseudomonas putida</i> cepa V1	Como conclusión, en este estudio se mostró el crecimiento y la capacidad de <i>P. putida</i> V1 para eliminar metilmercurio en una amplia gama de pH (4,0 y 8,0) y temperatura (10-35°C), su tolerancia a otros metales pesados y la capacidad de crecer en presencia de a 11,5 mL de metilmercurio.
33	Urík, Hlodák, Mikušová, & Matúš, (2014)	Potential of microscopic fungi isolated from mercury contaminated soils to accumulate and volatilize mercury(II)	Water, Air, & Soil Pollution	Springer	República Eslovaca	Suelo	Se cultivaron bajo condiciones estáticas en 8,2 a 32,7 mg L ⁻¹ de mercurio (II) rango de concentración para evaluar y comparar la bioacumulación de mercurio, resistencia a la cepa fúngica, y biovolatilización eficiencia. <i>Cladosporium</i>	Hongos filamentosos <i>Aspergillus</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Trichoderma</i> , y <i>Alternaria</i>	Los resultados ponen de manifiesto que la recuperación de mercurio del suelo de hongos filamentosos puede ser considerada significativo, si las condiciones para el crecimiento de hongos son suficientes. La biovolatilización puede ser

							aislados, que volatiliza casi el 80% del contenido inicial de mercurio durante el cultivo estático 7 días en la oscuridad.		beneficiario para los procesos de remediación naturales aplicados para suelos contaminados con mercurio.
34	Kurniati, Arfarita, & Imai, (2014)	Potential use of <i>Aspergillus flavus</i> strain krp1 in utilization of mercury contaminant	Procedia Environmental Sciences	Science Direct	Indonesia y Japón	Suelos contaminados	pH 5 – 7 Temperatura óptima 27.5°– 35°C. Concentración mínima inhibitoria (MIC) de esta cepa de hongos a mercurio fue de 100ppm	<i>Aspergillus flavus</i>	Los perfiles de crecimiento de la cepa KRP1 de <i>Aspergillus flavus</i> mostraron un crecimiento medio del cultivo con contenido de mercurio. Este resultado fue apoyado por la disminución de la concentración de mercurio y podría tener un mecanismo de degradación. Esto indica que esta cepa fungal tiene un potencial uso para áreas donde existe contaminante de mercurio.
35	Ekyastuti & Setyawati, (2015)	Identification and in vitro effectiveness test of four isolates of mercury-resistant bacteria as bioaccumulation agents of mercury	Procedia Environmental Sciences	Science Direct	Indonesia	Aguas contaminadas.	se inoculan en 100 ml de medio selectivo de Canstein líquido en Erlenmeyer que contiene 0 ppm, 10 ppm y 100 ppm de mercurio. Se incubaron	<i>Bacillus subtilis</i> <i>Burkholderia cepacia</i> <i>Burkholderia cenosepacia</i>	En el futuro, estos tres aislamientos de bacterias se pueden utilizar para limpiar el medio ambiente dañado por el oro ilegal minería. El mercurio es eliminado de los medios de relaves. Después de que los

							usando un agitador a 200 rpm durante 3x24 horas hasta cambio de color a ser turbia 6. Además, el líquido se agita usando una centrífuga a una velocidad de 5000 - 6000 Rpm		relaves estén limpios de los metales pesados del mercurio, La revegetación como parte de la recuperación de la tierra se puede realizar de manera óptima
36	Jan, Azam, Choi, Ali, & Rizwanul Haq, (2016)	Analysis for the presence of determinants involved in the transport of mercury across bacterial membrane from polluted water bodies of India	Brazilian Journal of Microbiology	Science Direct	India	Cuerpos de agua a través de la membrana bacteriana	Concentración de cloruro de mercurio (10 μ M, 100 μ M, 1,000 μ M) incubación a 37 ° C durante 16-18 h en un agitador de plataforma rotador incubadora (SCIGENICS) que opera a 250 rpm. Desnaturalización inicial a 94 ° C durante 5 min, seguido de 35 ciclos de desnaturalización a 94 ° C durante 1 min, hibridación a 56 ° C durante 1 min y extensión a 72 ° C durante 2 min y luego una extensión final a 72 ° C durante 5 min.	<i>Pseudomonas</i> y <i>Klebsiella</i>	El sistema de defensa bacteriana anteriormente para desintoxicar el mercurio se basa en la agrupación de genes que actúan de forma coordinada para transferir mercurio en el interior para la reducción a metálico volátil
37	Figueiredo, Canário, O'Driscoll, Duarte, & Carvalho, (2016)	Aerobic Mercury-resistant bacteria alter Mercury speciation and retention in the Tagus Estuary	Ecotoxicology and Environmental Safety	Science Direct	Portugal	Medio acuoso, agua residual contaminada	Reducción y volatilización del mercurio 6 – 50% Transformación 2-8% de mercurio	<i>V.fluvialis</i> , <i>B.megaterium</i> y <i>S.marcescens</i>	Los resultados obtenidos en condiciones controladas de laboratorio indican que las bacterias

		(Portugal)					total en metilmercurio en un tiempo de 48 h.		Hg-resistentes aeróbicas de la desembocadura del Tajo pueden afectar significativamente tanto la metilación y la reducción de mercurio y pueden tener una cara dual al proporcionar una vía para la dispersión de la contaminación mientras que la formación de metilmercurio, es altamente tóxico para los organismos vivos.
38	Benmalek & Fardeau, (2016)	Isolation and characterization of metal-resistant bacterial strain from wastewater and evaluation of its capacity in metal-ions removal using living and dry bacterial cells	International Journal of Environmental Science and Technology	Springer	Argelia y Francia	Sistema acuoso	pH 6 – 8.5 Capacidad de absorción 60 – 80% Tiempo de contacto 30 minutos	Género Micrococcus	Debido a su alta capacidad de acumulación de metal en condiciones aeróbicas, estas bacterias Gram-positivas pueden ser potencialmente aplicable en biorremediación in situ de metales pesados contaminantes sistemas acuosos.
Tratamiento biológico: Biorremediación									
Tipo de artículos: Resultado de Investigación									
N.	Autor/Año	Título	Revista	Base de datos	País	Sustrato	Condiciones experimentales	Organismo o biomasa	Conclusiones
39	Sas-Nowosielska, y otros, (2008)	Remediation aspect of microbial changes of plant rhizosphere in	Environ Monit Assess	Science Direct	Polonia	Suelo contaminado	Profundidad toma muestras de suelo 0 – 50 cm, utilizando un tamiz de 4mm	Salix viminalis Streptomyces	Se encontró que el número de <i>Pseudomonas</i> fue mayor en la Rizosfera en

		mercury contaminated soil					Temperatura media 22°C +/- 1 Humedad 58 – 62% Iluminación 16 h/d pH neutro 7,7		comparación con la zona libre de raíces. Muy probablemente el desarrollo de <i>Pseudomonas</i> fue apoyado por la excreción especial de la raíz.
40	Hutchison, Atwood, & Sanfilliann-Jiminez, (2008)	The removal of mercury from water by open chain ligands containing multiple sulfurs	Journal of Hazardous Materials	Science Direct	USA	Aguas contaminadas	Entre 0,20 y 0,26 g de cada precipitado de ligando de mercurio Se añadió a dos soluciones. pH: 7,0 durante 53 días.	Familia de quelatos de mercurio alquiltiol a añadir a los ligandos aromáticos	Estos nuevos compuestos son eficaces en la precipitación de mercurio a partir de agua y con un exceso del mejor compuesto, la eliminación es cuantitativa. Además, los precipitados son estables y se liberan poco a ningún mercurio de nuevo en solución durante los estudios de lixiviación.
41	Sinha & Khare, (2011)	Mercury bioaccumulation and simultaneous nanoparticle synthesis by <i>Enterobacter</i> sp. Cells	Bioresource Technology	Science Direct	India	Aguas contaminadas	pH 8.0 la separación de 0,327 nm	<i>Enterobacter</i> sp	Las nanopartículas se han caracterizado por microscopía de alta resolución electrónica de transmisión, análisis de rayos X de dispersión de energía, difracción de rayos X en polvo y microscopía de fuerza atómica. La cepa puede ser explotada para la bioacumulación de

									metal de efluente del medio ambiente y el desarrollo de un proceso de verde para la biosíntesis de nanopartículas.
42	Baldi, y otros, (2012)	Seasonal mercury transformation and surficial sediment detoxification by bacteria of Marano and Grado lagoons	Estuarine, Coastal and Shelf Science	Science Direct	Italia Eslovenia USA	Solución acuosa de las Lagunas Marano y Grado	<p>Composición Química de la materia orgánica Extracción de 4 g de sedimento liofilizado Con 8 ml de NaOH 0,5 N en un baño de ultrasonidos durante 2 h a 40°C</p> <p>Después de la reacción con el colorante, la absorbancia fue determinada a 595 nm.</p> <p>Cuantificación de cationes y aniones lavados con agua Los nutrientes se lavaron a partir de 1 g de muestra congelada con 50 ml De agua MilliQ después de 3 min de vórtex a 5°C</p>	Se aislaron cuatro cepas bacterianas Hg-resistentes, dos Gram-positivas (<i>Staphylococcus</i> y <i>Bacillus</i>) y dos Gram-negativas (<i>Stenotrophomonas</i> y <i>Pseudomonas</i>)	<p>Las cepas mostraron una alta resistencia y eficiencia para la remoción de Hg.</p> <p>Las tasas de desmetilación de Hg fueron 46 veces más altas que las tasas de metilación de Hg con la mayor diferencia en el verano cuando la desmetilación era de naturaleza oxidativa.</p>
43	Sinha, Kishore, & Kumar, (2012)	Studies on mercury bioremediation by alginate immobilized mercury tolerant <i>Bacillus cereus</i> cells	International Biodeterioration & Biodegradation	Science Direct	India	Solución acuosa	<p>Células inmovilizadas para ser 104,1 mg g⁻¹.</p> <p>El valor medio libre de la energía, según se evaluó usando el modelo</p>	<i>Bacillus cereus</i>	Se obtuvo el punto de avance después de 11 h de flujo continuo. Por lo tanto, según el estudio, el alginato inmovilizado <i>B. cereus</i> las células

							de Dubinin-Radushkevich (D-R), fue de 15,8 kJ mol ⁻¹ .		constituyen un sistema de remediación de mercurio prospectivo, que efectivamente se puede utilizar en medio acuoso contaminado con mercurio.
44	Sinha & Khare, (2012)	Mercury bioremediation by mercury accumulating <i>Enterobacter</i> sp. cells and its alginate immobilized application	Biodegradación	Springer	India	Solución acuosa (efluente sintético)	La carga inicial de 7,3 mg l ⁻¹ de mercurio en el efluente industrial se eliminó completamente en 72 h	<i>Enterobacter</i> sp.	El <i>Enterobacter</i> sp. En el presente trabajo fue capaz de acumular mercurio, sin ser diseñados en su forma nativa. También se indica la posibilidad de recuperar el mercurio acumulado de las células. La aplicabilidad de las células de alginato inmovilizada en la eliminación de mercurio a partir de efluentes industriales sintético y complejo en un modo por lotes se demostró ampliamente.
45	Kurniati E., y otros, (2014)	Potential bioremediation of mercury-contaminated substrate using filamentous fungi isolated from forest soil	Journal of Environmental Sciences	Science Direct	Indonesia Japón	Sustrato contaminado, hongos aislados de suelo forestal.	La cepa fue capaz de eliminar 97,50% y 98,73% de mercurio a partir de sistemas sacudidos y estáticos, respectivamente. Incubación de las	Hongos filamentosos aislados de suelo forestal.	Esta investigación observó la capacidad de los hongos filamentosos aislados de suelo forestal para la biorremediación de contaminación de mercurio en un

							esporas a 30°C por 7 días		sustrato.
46	Ma, y otros, (2015)	Citric acid facilitated thermal treatment: An innovative method for the remediation of mercury contaminated soil	Journal of Hazardous Materials	Science Direct	China - Reino Unido	Suelo contaminado	<p>Contenido de Hg se redujo a <1,5 mg / kg cuando se trata a 400 ° C con ácido cítrico.</p> <p>Reducción entrada de energía en un 35%</p> <p>Se redujo con éxito de 134 mg / kg a 1,1 mg / kg cuando se trata a 400 ° C durante 60 min</p>	Ácido Cítrico	Este método redujo el consumo de energía en un 35% en comparación con el método tradicional de tratamiento térmico, y dio lugar a la reutilización de tierras agrícolas, proporcionando así un método de remediación más verde y más sostenible para el tratamiento de suelos contaminados de mercurio en aplicaciones de ingeniería futuras.
47	Giovanella, y otros, (2015)	Detoxification of mercury by bacteria using crude glycerol from biodiesel as a carbon source	Water, Air, & Soil Pollution	Springer	Brasil	Glicerol Levadura suplementar el medio de cultivo con nutrientes	<p>pH: 6</p> <p>Incubación 30°C por 48h</p> <p>Porcentaje de remoción 80%</p>	<i>Pseudomonas Serratia, Citrobacter, Klebsiella, y Bacillus</i>	Los mejores resultados de la eliminación de mercurio y del Radiación se obtuvieron utilizando aislados de <i>Serratia marcescens</i> M25C, <i>Klebsiella pneumoniae</i> PLB, <i>Klebsiella oxytoca</i> y <i>Arthrobacter</i> sp. U3. <i>Arthrobacter</i> sp. U3 es común en los suelos y tiene probado ser un candidato prometedor para el medio ambiente
48	Gupta &	Evaluation of	Internation	Springer	India	Lodos	5% de	Alcaligenes	El cultivo se

	Nirwan, (2015)	mercury biotransformation by heavy metal-tolerant <i>Alcaligenes</i> strain isolated from industrial sludge	Journal of Environmental Science and Technology			industriales	volatilización de mercurio 60% de mercurio secuestrado en la biomasa bacteriana		caracterizó morfológicamente, fisiológicamente y bioquímicamente. 16S rRNA secuencia del gen de JS-1 reveló su relación filogenética y 98% de homología con <i>Alcaligenes faecalis</i> , una bacteria Gram-negativa en forma de barra.
49	Mahbub, Krishnan, Megharaj, & Naidu, (2016)	Bioremediation potential of a highly mercury resistant bacterial strain <i>Sphingobium</i> SA2 isolated from contaminated soil	Chemosphere	Science Direct	Australia	Suelo contaminado	79% de mercurio en suspensión se volatiliza en un tiempo de 6 horas	<i>Sphingobium</i> SA2	La cepa bacteriana SA2 fue aislado del suelo contaminado con mercurio. La secuencia del gen 16S rRNA de este aislado mostró 99% de similitud de secuencia con la <i>Sphingobium</i> géneros y <i>Sphingomonas</i> de grupo α -proteobacteria.
50	Giovanella, Cabral, Gianello, Bento, & Oliveira Camargo, (2016)	Mercury (II) removal by resistant bacterial isolates and mercuric (II) reductase activity in a new strain of <i>Pseudomonas</i> sp. B50A	New Biotechnology	Science Direct	Brasil	Actividad enzimática	Porcentaje de remoción 86% pH 8.0 Rangos de temperatura 37 – 45 °C.	<i>Pseudomonas</i> sp. B50A	El aislado y la enzima detectada eran eficaces en la reducción de Hg (II) a Hg (0), que muestra el potencial para desarrollar tecnologías y procesos para limpiar-up el medio ambiente y los residuos contaminados con

									mercurio de biorremediación.
51	J Gabriel, Švec, Kolihová, Tlustoš, & Száková, (2016)	Translocation of mercury from substrate to fruit bodies of <i>Panellus stipticus</i> , <i>Psilocybe cubensis</i> , <i>Schizophyllum commune</i> and <i>Stropharia rugosoannulata</i> on oat flakes	Ecotoxicology and Environmental Safety	Science Direct	Republica Checa	Sustrato cuerpos furtales	pH 6.0 Porcentaje de remoción 90%	<i>Panellus stipticus</i> , <i>Psilocybe cubensis</i> , <i>Schizophyllum commune</i> and <i>Stropharia rugosoannulata</i>	La fecundación de hongos que podrían utilizarse para diversos estudios Bioacummulación de metales tóxicos o estratégicos para diversos fines; Entre otros, también para estudios cuantitativos de la formación volátil de compuestos de Hg o la volatilización de otros xenobióticos por hongos
52	Khani, Moudi, & Khojeh, (2016)	Contamination level, distribution and health risk assessment of heavy and toxic metallic and metalloid elements in a cultivated mushroom <i>Pleurotus florida</i> (Mont.) singer	Environmental Science and Pollution Research	Springer	Irán	Suelos contaminados	Se recogieron un total de 5 muestras A 105 ° C durante 24 h	<i>Pleurotus florida</i>	En este estudio, los Hris individuales eran menos de 1, lo que indica un potencial riesgo para la salud significativo asociado con el consumo de setas objetivo de los sustratos estudiados.
53	Wang, y otros, (2017)	Aerobic and anaerobic biosynthesis of nano-selenium for remediation of mercury contaminated soil	Chemosphere	Science Direct	China Reino Unido Taiwan Arabia Saudita Bangladesh	Suelos contaminados	PH:7 0,2% de extracto de levadura se cultivaron a 26°C En frascos de 250 ml con agitación constante a 150 rpm	<i>Citrobacter freundii</i> Y9	La Biosíntesis de nano-Se 0 tanto aeróbicas y anaeróbicas, por tanto, proporciona un enfoque remedación versátil y rentable para Hg 0 contaminadas con la superficie y el subsuelo, donde el

							durante 10 min		potencial redox a menudo cambia dramáticamente.
54	Hernández Balderas, Morales Roa, Silva Ramírez, Romo Romero, & Sevilla (2017)	Effective mercury(II) bioremoval from aqueous solution, and its electrochemical determination	Chemosphere	Science Direct	México	Residuos agrícolas	Porcentaje de remoción 99,4% Capacidad máxima de adsorción de mercurio $111,1 \pm 0,3 \text{ mg g}^{-1}$	<i>Allium cepa</i> L.	Este trabajo presenta una nueva perspectiva para la eliminación de mercurio (II) a partir de agua contaminada para la remediación ambiental.
55	Belzile, (2006)	Detoxification of selenite and mercury by reduction and mutual protection in the assimilation of both elements by <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Science of the Total Environment	Science Direct	Canadá	Suelo y aguas contaminadas.	pH: 6,8 El medio se dispensó en alícuotas 20,0 mL en 50 tubos de ensayo Durante 20 minutos a 121 ° C. Temperatura ambiente durante 24 a 48 h. 140 rpm.	<i>Pseudomonas fluorescens</i> .	El hallazgo más importante en este estudio es la identificación del papel antagonico del selenio en la asimilación de mercurio por <i>P. fluorescens</i> . Los estudios de interacción del mercurio y el selenio mostraron que el Se (IV) es un agente muy eficaz contra los peligros del envenenamiento del mercurio.
56	De Ramaiah, & (2007)	Characterization of marine bacteria highly resistant to mercury exhibiting multiple resistances to toxic chemicals	Ecological Indicators		India	Solución acuosa de mercurio	Procedencia de las bacterias resistentes al mercurio: agua y sedimentos de mar Agar nutritivo (SWNA: 5,0 g de peptona, 1,5 g de extracto de carne de vacuno, 1,5 g de extracto de	<i>Pseudomonas Alcaligenes Brevibacterium Bacillus</i>	La curva de crecimiento de los aislamientos presentó una prolongación de la fase exponencial, durante el tiempo requerido para la adaptación fisiológica al medio tóxico al cual fueron sometidos.

							<p>levadura, 500 mL de agua de mar envejecida, 500 mL agua desionizada y 15 g de agar) con 10 ppm (50 mM Hg) de HgCl.</p>		<p>Los aislamientos mostraron baja o nula sensibilidad a antibióticos.</p> <p>El estudio demostró la presencia de diversos grupos de procariotas marinas, con alta capacidad de tolerar el mercurio y con potencial para degradar una variedad de metales pesados y xenobióticos.</p>
57	Bayramoglu & Yakup Arica, (2008)	Removal of heavy mercury(II), cadmium(II) and zinc(II) metal ions by live and heat inactivated <i>Lentinus edodes</i> pellets	Chemical Engineering Journal	Science Direct	Turquía	Solución Acuosa	<p>pH 6,0</p> <p>Rango de temperatura 14 – 45 °C</p> <p>intervalo de concentración de 25-600 mg / L.</p> <p>Capacidades de biosorción de metal de los gránulos de hongos vivos Hg²⁺, Cd²⁺ y Zn²⁺ fueron 336,3 ± 3,7, 78,6 ± 2,6 y 33,7 ± 1,6 mg / g, respectivamente, mientras que Hg²⁺, Cd²⁺ y Zn²⁺ las capacidades de biosorción de los pellets inactivadas por calor fueron 403,0 ± 2,9, 274,3 ± 3,6 y 57,7 ± 1,1 mg</p>	<i>Lentinus edodes</i>	<p>Las capacidades de adsorción del hongo inactivado por calor para metales fueron marcadamente aumentaron en comparación con la forma nativa. Para ambas formas se observó el mismo orden de afinidad en una base molar para los iones de una o varias de metal (Hg²⁺ > Cd²⁺ > Zn²⁺)</p>

							/ respectivamente. g,		
58	Li & Ramakrishna, (2011)	Effect of multiple metal resistant bacteria from contaminated lake sediments on metal accumulation and plant growth	Journal of Hazardous Materials	Science Direct	USA	IAA y fosfato y la solubilización de metal	Capacidad de bioacumulación de Zn (hasta 15,9 mg / g de célula seca) y Pb (80,7 mg / célula seca g), respectivamente.	Cepas bacterianas TLC 3-3.5-1 y TLC 6-6.5-1	Los múltiples aislados bacterianos resistentes de metal caracterizados en nuestro estudio tienen aplicaciones potenciales para remediación de suelos contaminados de metal en combinación con plantas y agua contaminada metal.
Tratamiento biológico: Rizorremediación									
Tipo de artículos: Resultado de Investigación									
N.	Autor/Año	Título	Revista	Base de datos	País	Sustrato	Condiciones experimentales	Organismo o biomasa	Conclusiones
59	Sorkhoh, y otros, (2010)	Phytoremediation of mercury in pristine and crude oil contaminated soils: Contributions of rhizobacteria and their host plants to mercury removal	Ecotoxicology and Environmental Safety	Science Direct	Kuwait	Suelos con cultivos de leguminosas	El potencial de atenuación de petróleo crudo de la rizobacterias individuo fue inhibida por HgCl ₂ pero aproximadamente el 50% o más de este potencial todavía se mantuvo en presencia de hasta 40 mg l ⁻¹ HgCl ₂ .	Citrobacter freundii , Enterobacter aerogenes , Aurantiacum Exiquobacterium , Pseudomonas veronii , Micrococcus luteus , Brevibacillus brevis , Arthrobacter sp. y psychrophilum Flavobacterium .	Se concluyó que tanto las plantas de colectores y sus consorcios bacterianos rizosféricas contribuyeron de forma equivalente a la eliminación de mercurio del suelo.
Tratamiento biológico: Ficorremediación									
Tipo de artículos: Resultado de Investigación									
N.	Autor/Año	Título	Revista	Base de datos	País	Sustrato	Condiciones experimentales	Organismo o biomasa	Conclusiones
60	Carro, Barriada, Herrero, & Sastre de	Adsorptive behaviour of mercury on algal biomass:	Journal of Hazardous Materials	Science Direct	España	Aguas contaminadas con mercurio.	pH: 5 La biomasa se secó al horno a 60	Biomasa de algas	Los resultados obtenidos en este estudio han demostrado que S.

	Vicente, (2011)	Competition with divalent cations and organic compounds					<p>°C durante 24 h. 175 rpm.</p> <p>Se utilizó mercurio en un rango de concentración de 0,25 mmol / L a 5 mmol / L. Las mezclas de 40 ml de solución metálica y 0,1 g de biomasa se agitaron durante 24 h. Se ajustó el pH Valor óptimo para la sorción de mercurio de acuerdo con la experimentar.</p>		<p>muticum es un Buen adsorbente para la eliminación del mercurio incluso en altas concentraciones del metal.</p> <p>Los experimentos de flujo continuo permitieron identificar la reducción del mercurio (II) en mercurio (I) y el proceso de eliminación del mercurio en la solución.</p>
61	Bayramoğlu, Tuzun, Celik, Yilmaz, & Yakup Arica, (2006)	Biosorption of mercury(II), cadmium(II) and lead(II) ions from aqueous system by microalgae <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> immobilized in alginate beads	Int. J. Miner. Process.	Science Direct	Turquía	Perlas de alginato	<p>Perlas de Ca- alginato que contienen microalgas inmovilizadas se incubaron para el crecimiento uniforme a 22 ° C durante 5 días.</p> <p>pH 6,0</p> <p>La adsorción de estos iones en la microalgas inmovilizado siguió una cinética de segundo orden y el equilibrio se estableció en aproximadamente 60 min</p>	<i>reinhardtii</i> <i>Chlamydomonas</i>	El cambio de temperatura en el intervalo de 5-40 ° C no afectó a las capacidades de adsorción de las microalgas inmovilizadas.
62	Carro, Barrada,	Interaction of heavy metals	Chemical Engineering	Science Direct	España	Biomasa natural	El cadmio y plomo experimentos han	<i>Sargassum muticum</i> biomasa	Comparando los resultados de

	Herrero, Sastre Vicente, (2015)	& de	with Ca-pretreated Sargassum muticum algal biomass: Characterization as a cation exchange process	Journal				demostrado una relación 1: 1 entre la cantidad de metal intercambiado entre el material y el calcio liberado de nuevo a la solución.	de algas	mercurio con los de cadmio, se puede suponer que la eliminación de mercurio no sólo está asociada con un mecanismo de intercambio, sino también de reducción se lleva a cabo. SEM y análisis EDS confirmaron para la primera reducción de mercurio tiempo después de los experimentos por lotes de sorción.
--	---------------------------------	------	---	---------	--	--	--	--	----------	---

Tabla 5. Relación de artículos de revisión de tema, de acuerdo con el tratamiento empleado.

N.	Autor/Año	Título	Revista	Base de datos	País	Conclusiones
1	Srivastava, Agrawal, & Mondal, (2015)	A review on progress of heavy metal removal using adsorbents of microbial and plant origin	Environmental Science and Pollution Research	Springer	India	Su bajo coste, alta eficiencia, y la posibilidad de regeneración de adsorbente para la reutilización y la recuperación de iones metálicos para diversos fines han atraído a los científicos a trabajar en esta técnica.
2	Salman, Athar, & Farooq, (2015)	Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using indigenous and modified lignocellulosic materials	Reviews in Environmental Science and Bio/Technology	Springer	Pakistán	La evaluación de materiales lignocelulósicos bajo costo en muestras múltiples de metal y muestras del mundo real, (2) métodos de bajo costo de modificación, (3) el desarrollo de materiales lignocelulósicos multifuncionales pueden ayudar a disminuir esta barrera.
3	Lata, Singh, & Samadder, (2015)	Regeneration of adsorbents and recovery of heavy metals: a review	International Journal of Environmental Science and Technology	Springer	India	El estudio ayudará a la comunidad científica que trabaja en estudios de adsorción para tomar iniciativas de investigación necesarias para hacer frente a los métodos de recuperación factibles de metales pesados de los adsorbentes utilizados, para estudiar la posible reutilización de los agentes desadsorción y elegir una desorción adecuada / agente regenerador para un adsorbente particular.
4	Sen, Pereira, Olivella, & Villaescusa, (2015)	Heavy metals removal in aqueous environments using bark as a biosorbent	International Journal of Environmental Science and Technology	Springer	Portugal España	La corteza ofrece una alternativa verde para eliminar los metales pesados de las aguas industriales.
5	(Jain, Malik, & Yadak,	Applicability of plant based	Environmental	Springer	India	El proceso de adsorción

	(2016)	biosorbents in the removal of heavy metals: a review	Processes			Se ve afectado por el pH, la temperatura, la concentración inicial y el tamaño de partícula. Sin embargo, los biosorbentes se emplean en su mayor parte para la remediación de metales en residuos sintéticos.
6	Okenicová, Zemberyová, Prochazková, (2016) &	Biosorbents for solid-phase extraction of toxic elements in waters	Environmental Chemistry Letters	Springer	República Eslovaca	Las posibles aplicaciones de las nuevas sorbentes seleccionados disponibles para su uso en análisis de metales traza en aguas utilizando extracción en fase sólida. Destacamos la pre concentración de los elementos tóxicos antes de su determinación por espectrometría atómica.
7	Chen & Yang, (2012)	Mercury toxicity, molecular response and tolerance in higher plants	Biometals	Springer	China	La emisión de mercurio al ambiente, ha generado problemas ambientales globales por su alta toxicidad. El Hg acumulado por los cultivos no sólo ejerce efectos perjudiciales en estos, sino que también amenaza la salud humana a través de las cadenas alimentarias. La sobrecarga de Hg en cultivos interrumpe muchos procesos biológicos. Por lo tanto, es muy importante diseccionar la respuesta toxicológica y adaptativa al metal pesado tóxico. La fitotoxicidad inducida por el Hg está mediada por varias moléculas importantes de señalización como NO, SA y CO. Además, el análisis del transcriptoma en todo el genoma contribuye en gran medida a nuestra comprensión De la expresión génica

						<p>inducida por Hg y sus redes reguladoras en plantas a niveles transcripcionales y post-transcripcionales. Este enfoque proporciona numerosos genes que pueden ser potencialmente utilizados para estudiar los mecanismos reguladores que conducen a la acumulación de metales pesados en las plantas. La manipulación genética y la cría molecular de cultivares de plantas para minimizar la acumulación de Hg parece ser un sustituto prospectivo para reducir el riesgo de que el Hg ingrese en la cadena alimentaria humana.</p>
8	Padmavathramma & Yi, (2007)	Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants	Water, Air, and Soil Pollution	Springer	Canadá	<p>Los resultados revelan que la fitorremediación incluye una variedad de técnicas de rehabilitación, que incluyen muchas de las estrategias de tratamiento que conducen a la degradación del contaminante, la remoción (a través de la acumulación o disipación), o inmovilización. Para cada uno de estos procesos, se revisa lo que se conoce de los contaminantes metálicos, lagunas en el conocimiento, y las implicaciones prácticas para las estrategias de fitorremediación.</p>
9	Bhargava, Carmona, Bhargava, & Srivastava, (2012)	Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals	Journal of Environmental Management	Science Direct	Chile India	<p>Las herramientas genéticas de mejora genética clásica y la ingeniería genética han abierto la puerta a la creación de cultivos 'remediación'. Una visión general se presenta en las posibles estrategias para el</p>

						desarrollo de nuevos genotipos con aumento de la acumulación de metal y la tolerancia a la toxicidad.
10	Leung, y otros, (2013)	Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of metal-contaminated soils: a review	Pedosphere	Science Direct	China	Los hongos pueden facilitar la supervivencia de sus plantas huésped que crecen en la tierra contaminada con metal mejorando su adquisición de nutrientes, y protegiéndolos de la toxicidad de los metales. Esto mejora la fitoestabilización y fitoextracción.
11	Mani & Kumar, (2014)	Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: an overview with special reference to phytoremediation	International Journal of Environmental Science and Technology	Springer	India	Esta revisión destaca una mejor comprensión de los problemas asociados con la toxicidad de metales pesados en los ecosistemas contaminados y sus tecnologías de biorremediación, sostenibles y ecológicas viables, especialmente los mecanismos de fitorremediación de metales pesados, junto con algunos estudios de casos en la India y en el extranjero.
12	Ulla, y otros, (2015)	Diazotrophs-assisted phytoremediation of heavy metals: a novel approach	Environmental Science and Pollution Research	Springer	Pakistán	Los diazótrofos mejoran el potencial de fitorremediación de las plantas mediante la fijación de nitrógeno, la disminución del pH del suelo, Proporcionando minerales, solubilización de fosfato y producción de sideróforos, IAA y ACC-desaminasa. Otras contribuciones incluyen movilización, bioacumulación, biosorción, Y desintoxicación de metales.
13	Sharma, Singh, & Manchanda, (2015)	Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy	Environmental Science and Pollution Research	Springer	India y Corea	En este contexto, se ha hecho un intento de revisar los diferentes modos de la fitorremediación y diversas plantas terrestres y acuáticos

		metal contaminated soil and water				que están siendo utilizados para remediar los metales pesados y el suelo radionúclido contaminados y sistemas acuáticos.
14	Caslake, Harris, Williams, & Waters, (2006)	Mercury-resistant bacteria associated with macrophytes from a polluted lake	Water, Air, and Soil Pollution	Springer	USA	Se describe Una posible explicación para la asociación de las bacterias resistentes de mercurio con macrófitos. Esta hipótesis sugiere que Hg r bacterias pueden potencialmente mejorar los efectos negativos que el mercurio provoca en los macrófitos.
15	Dash & Das, (2015)	Bioremediation of mercury and the importance of bacterial mer genes	International Biodeterioration & Biodegradation	Science Direct	India	Los procesos de biorremediación se consideran más ventajosos Otras técnicas de remediación. Resistente al mercurio Las bacterias poseen el operón mer en su genoma, lo que permite Para sobrevivir en presencia de mercurio y para convertir los tóxicos Formas de mercurio a formas no tóxicas.
16	Wang J. , Feng, Anderson, Xing, & Shang, (2012)	Remediation of mercury contaminated sites – A review	Journal of Hazardous Materials	Science Direct	China Nueva Zelanda	El objetivo de este trabajo es presentar una comprensión-up-hasta la fecha de las técnicas disponibles para la remediación de suelos contaminados con mercurio a través de considerar: la contaminación de mercurio en el suelo, la especiación del mercurio en el suelo; la toxicidad del mercurio para los seres humanos, plantas y microorganismos, y las opciones de corrección.
17	Chételat, Braune, Stow, & Tomlinson,	Special issue on mercury in Canada's North: Summary	Science of the Total Environment	Science Direct	Canadá	Es una revisión de tema no presenta condiciones

	(2015)	and recommendations for future research				experimentales
18	He, y otros, (2015)	In situ remediation technologies for mercury-contaminated soil	Environmental Science and Pollution Research	Springer	China Australia USA	La desorción térmica, electrocinéticos, y enjuague del suelo / lavado tratamientos son tecnologías de eliminación que movilizan y la captura de especies de Hg insolubles, mientras que la contención, la solidificación / estabilización, y la vitrificación inmovilizan Hg mediante la conversión formas a menos solubles.
19	Vangronsveld, y otros, (2009)	Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field	Environmental Science and Pollution Research	Springer	Bélgica	Está claro que a pesar de un público cada vez mayor y el interés comercial y el éxito de varios estudios piloto y aplicaciones a escala de campo de investigación más fundamental sigue siendo necesaria para explotar mejor la diversidad metabólica de las plantas mismas, sino también para comprender mejor las complejas interacciones entre contaminantes, el suelo, las raíces de plantas y microorganismos (bacterias y micorrizas) en la rizosfera
20	Kavamura & Esposito, (2010)	Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals	Biotechnology Advances	Science Direct	Brasil	En la presente revisión se presentan algunas técnicas de remediación para remediar los suelos, centrándose en el uso de plantas que son capaces de sobrevivir en suelos con metales pesados, junto con la función de algunos microorganismos en el proceso de restauración.
21	Singh, Abhilash, Singh, Singh, & Singh, (2011)	Genetically engineered bacteria: An emerging tool for environmental remediation	Gene	Science Direct	India	La ingeniería genética de la microflora autóctona, bien adaptada a las condiciones ambientales locales, puede

		and future research perspectives				ofrecer biorremediación más eficiente de los sitios contaminados y haciendo que la biorremediación más viable y tecnología ecológica.
22	Gómez-Sagasti, y otros, (2012)	Microbial monitoring of the recovery of soil quality during heavy metal phytoremediation	Water, Air, & Soil Pollution	Springer	España	Para una mejor interpretación de las propiedades microbianas como indicadores de la calidad del suelo, pueden ser agrupados dentro de las categorías de mayor relevancia ecológica, tales como las funciones del suelo, atributos de salud de los ecosistemas y servicios de los ecosistemas.
23	Masciandaro, Macci, Peruzzi, Cercanti, & Doni, (2013)	Organic matter–microorganism–plant in soil bioremediation: a synergic approach	Reviews in Environmental Science and Bio/Technology	Springer	Italia	Se reconoce ampliamente que la planta, a través de materiales orgánicos, nutrientes y suministro de oxígeno, produce un microambiente rico capaz de promover la proliferación y la actividad microbiana.
24	Aryal & Liakopoulou-Kyriankides (2015)	Bioremoval of heavy metals by bacterial biomass	Environmental Monitoring and Assessment	Springer	Grecia	El documento evalúa la diferente cinética, equilibrio, y modelos termodinámicos utilizados en la sorción bacteriana de metales pesados. También se discuten caracterización de biomasa y los mecanismos de sorción, así como la elución de iones metálicos y la regeneración de la biomasa.
25	Singh & Prasad, (2015)	Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement	International Journal of Environmental Science and Technology	Springer	India	Recientemente, las aplicaciones de nanopartículas para la remediación de metal también están atrayendo gran interés la investigación debido a su adsorción excepcional y propiedades mecánicas y la propiedad eléctrica única, la

						estabilidad altamente química, y gran área superficial específica. Por lo tanto, los presentes ofertas de revisión con diferentes enfoques de gestión para reducir el nivel de contaminación de metal en el suelo y, finalmente, a la cadena alimentaria
26	Venkateswarly, y otros, (2016)	Abandoned metalliferous mines: ecological impacts and potential approaches for reclamation	Reviews in Environmental Science and Bio/Technology	Springer	Australia India	Se sugiere el uso de la fitorremediación y la nanotecnología microbiano mejorado para la recuperación eficiente de AML, e identificar el trabajo futuro garantizado en esta área de investigación. Además, creemos que la integración de la ciencia de la remediación de las políticas y reglamentos de la minería es una opción fiable que cuando se ejecuta virtualmente puede equilibrar el desarrollo económico y la destrucción del medio ambiente para el futuro más seguro.
Tratamiento biológico: Rizorremediación						
Tipo de artículos: De revisión						
60	Khan, Zaidi, Wani, & Oves, (2009)	Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils	Environmental Chemistry Letters	Springer	India	El advenimiento de la tecnología de biorremediación ha proporcionado una alternativa a los métodos convencionales para la remediación de los suelos envenenado-metal. En los suelos contaminados con metales, el papel natural de rizobacterias promoción de crecimiento de la planta de metales tolerante en el mantenimiento de la fertilidad del suelo es más importante que en la agricultura convencional, en donde un

						mayor uso de productos agroquímicos minimizar su significado.
--	--	--	--	--	--	---

4. CONCLUSIONES

- La minería es una actividad económica de importancia en el departamento de Caldas, en la cual es importante valorar el estado de la contaminación por metales pesados, principalmente de mercurio y con ello proponer alternativas de recuperación de suelo y agua, que permitan dar un uso sostenible a estas regiones.
- Se obtuvieron 90 documentos a través del uso de los descriptores *mercury detoxification*, *biosorption of mercury*, *phytoremediation of mercury*, *rhizoremediation of mercury*, en las bases de datos *Science Direct* y *Springer* (2006-2017).
- Se encontraron 53 documentos de investigaciones específicas en degradación de mercurio, y 37 en reportes de trabajos en metales pesados incluidos el mercurio.
- De los 90 reportes seleccionados, el 70% correspondieron a estudios experimentales y el 30% a artículos de revisión de tema.
- En el 2015 se apreció una alta producción de artículos en biorremediación, bioadsorción y fitorremediación, especialmente en artículos resultado de investigación.
- India es el principal país de procedencia de las investigaciones y de las revisiones de tema. En este país se concentra el 23% de los estudios en bioadsorción, el 25% en biorremediación y el 15% en selección de microorganismos.
- Colombia es un país biodiverso lo que permite encontrar una variedad de plantas, hongos, algas, y en general de sustratos, que posibilitan el desarrollo de los estudios de biorremediación de contaminantes como el mercurio.
- Se propone al Grupo de Investigación en Desarrollos Tecnológicos y Ambientales- GIDTA, el análisis de alternativas reportadas en trabajos de investigación de interés, con el fin de ser evaluadas en el departamento y así ampliar el impacto de las investigaciones realizadas en la línea de investigación en Saneamiento, gestión y desarrollo ambiental, en el tema de biorremediación que toma fuerza en los últimos años.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(s.f.).

Sepúlveda, T. V., & Trejo, J. V. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Mexico: Instituto Nacional de Ecología.

Abdel Rahman, R. A., Abou Shanab, R. A., & Moawad, H. (2008). Mercury detoxification using genetic engineered *Nicotiana tabacum*. *Global NEST Journal*, 432- 438.

Alcaldía de Marmato. (2007). Obtenido de <http://www.marmato-caldas.gov.co/index.shtml>

Allouchea, F.-N., Guibal, E., & Mameri, N. (2014). Preparation of a new chitosan-based material and its application for mercury sorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 224 – 232.

Álvarez, J. D. (2013). Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato- Caldas. Universidad de Manizales.

Alvarez, J., Sotero, V., Brack, A., & Ipenza, C. (2011). *Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio. Una bomba de tiempo*. Lima: Ministerio del Ambiente.

Arroyabe, M. d. (2004). La lenteja de agua (*Lemma minor* L.): una planta acuática promisoría. *Revista EIA*, 33-38.

Aryal, M., & Liakopoulou-Kyriankides, M. (2015). Bioremoval of heavy metals by bacterial biomass. *Environmental Monitoring and Assessment* .

Bakatula, E. N., Cukrowska, E. M., Weiersbye, I. M., Mihaly-Cozmuta, L., Peter, A., & Tutu, H. (2014). Biosorption of trace elements from aqueous systems in gold mining sites by the filamentous green algae (*Oedogonium* sp.). *Journal of Geochemical Exploration*, 492 – 503.

Baldi, F., Gallo, M., Marchetto, D., Fani, R., Maida, I., Horvat, M., . . . Hines, M. (2012). Seasonal mercury transformation and surficial sediment detoxification by bacteria of Marano and Grado lagoons. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 105 - 115.

Bayramoglu, G., & Yakup Arica, M. (2008). Removal of heavy mercury(II), cadmium(II) and zinc(II) metal ions by live and heat inactivated *Lentinus edodes* pellets. *Chemical Engineering Journal*, 133 – 140.

Bayramoğlu, G., Tuzun, I., Celik, G., Yilmaz, M., & Yakup Arica, M. (2006). Biosorption of mercury(II), cadmium(II) and lead(II) ions from aqueous system by microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* immobilized in alginate beads. *Int. J. Miner. Process*, 35–43.

- Belzile, N. (2006). Detoxification of selenite and mercury by reduction and mutual protection in the assimilation of both elements by *Pseudomonas fluorescens*. *Science of the Total Environment*, 704–714.
- Benmalek, Y., & Fardeau, M. L. (2016). Isolation and characterization of metal-resistant bacterial strain from wastewater and evaluation of its capacity in metal-ions removal using living and dry bacterial cells. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2153–2162.
- Bernal González, M. (2012). *Revista de Logística*. Obtenido de <http://revistadelogistica.com/actualidad/mineria-de-oro-en-colombia-auge-y-problematika/>
- Bhargava, A., Carmona, F. F., Bhargava, M., & Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 103-120.
- Bose-O'Reilly, S., Drasch, G., Beinhoff, C., Maydi, S., Vosko, M., Rorder, G., & Dzaja, D. (2003). The Mt. Diwata study on the Philippines 2000-treatment of mercury intoxicated inhabitants of a gold mining area with DMPS (2,3-dimercapto-1-propane-sulfonic acid, Dimaval). *Sci Total Environ*, 71 - 82.
- Bose-O'Reilly, S., Lettmeier, B., Gothe, R., Beinhoff, C., Siebert, U., & Drasch, G. (2008). Mercury as a serious health hazard for children in gold mining areas. *Environ Res.*, 89 - 97.
- Cabral, L., Giovanella, P., Gianello, C., Bento, F. M., Andrezza, R., & Camargo, F. A. (2013). Isolation and characterization of bacteria from mercury contaminated sites in Rio Grande do Sul, Brazil, and assessment of methylmercury removal capability of a *Pseudomonas putida* V1 strain. *Biodegradation*, 319 – 331.
- Cárdenas, M., & Reina, M. (8 de Abril de 2008). La minería en colombia: impacto socioeconómico y fiscal. Bogotá: FEDESARROLLO.
- Carro, L., Barriada, J. L., Herrero, R., & Sastre de Vicente, M. E. (2011). Adsorptive behaviour of mercury on algal biomass: Competition with divalent cations and organic compounds. *Journal of Hazardous Materials*, 284 – 291.
- Carro, L., Barriada, J. L., Herrero, R., & Sastre de Vicente, M. E. (2015). Interaction of heavy metals with Ca-pretreated *Sargassum muticum* algal biomass: Characterization as a cation exchange process. *Chemical Engineering Journal*, 181 - 187.
- Caslake, L. F., Harris, S. S., Williams, C., & Waters, N. M. (2006). Mercury resistant bacteria associated with macrophytes from a polluted laked. *Water, Air and Soil Pollution*, 174-193.
- Cassina, L., Tassi, E., Pedron, F., Petruzzelli, G., Ambrosini, P., & Barbafieri, M. (2012). Using a plant hormone and a thioligand to improve phytoremediation of Hg-contaminated soil from a petrochemical plant. *Journal of Hazardous Materials*, 36 – 42.

- Chen, J., & Yang, Z. M. (2012). Mercury toxicity, molecular response and tolerance in higher plants. *Biometals.*, 847-57.
- Chételat, J., Braune, B., Stow, J., & Tomlinson, S. (2015). Special issue on mercury in Canada's North: Summary and recommendations for future research. *Science of the Total Environment*, 260-262.
- Concas, S., Lattanzi, P., Bacchetta, G., Barbafieri, M., & Vacca, A. (2015). Zn, Pb and Hg Contents of *Pistacia lentiscus* L. Grown on Heavy Metal-Rich Soils: Implications for Phytostabilization. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226-340.
- Cordy, P. (2013). *Estudio de Caso : La Segovia, Colombia técnicas mejores que mejore la extracion de oro y el uso del mercurio*. Paul Cordy y Biodiversity Research Institute.
- Cozzolino, V., De Martino, A., Nebbioso, A., Di Meo, V., Salluzzo, A., & Piccolo, A. (2016). Plant tolerance to mercury in a contaminated soil is enhanced by the combined effects of humic matter addition and inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Environmental Science and Pollution Research*, 11312-11322.
- Crakó, M., Feng, X., He, Y., Liang, D., & Márton, L. (2006). Transgenic *Spartina alterniflora* for phytoremediation. *Environ Geochem Health.*, 103-110.
- Dash, H. R., & Das, S. (2015). Bioremediation of inorganic mercury through volatilization and biosorption by transgenic *Bacillus cereus* BW-03(pPW-05). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 179 - 185.
- de Cárcer García, D. A. (2007). Estudio de los efectos causados por la introduccion de sistemas de rizorremediacion en las poblaciones bacterianas nativas de un suelo contaminado por PCBs. Gwangju , Corea del Sur: Universidad autonoma de madrid.
- De, J., & Ramaiah, N. (2007). Characterization of marine bacteria highly resistant to mercury exhibiting multiple resistances to toxic chemicals. *Ecological Indicators*, 511– 520.
- Deng, X., & Wang, P. (2012). Isolation of marine bacteria highly resistant to mercury and their bioaccumulation process. *Bioresource Technology*, 342 – 347.
- Ekyastuti, W., & Setyawati, T. R. (2015). Identification and in vitro effectiveness test of four isolates of mercury-resistant bacteria as bioaccumulation agents of mercury. *Procedia Environmental Sciences*, 258 – 264.
- Ferrera Cerrato, R., Rojas Avelizapa, N., Poggi Varaldo, H., Alarcón, A., & Cañizares Villanueva, R. O. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 179 - 187.

- Fidalgo, C., Henriques, I., Rocha, J., Tacão, M., & Alves, A. (2016). Culturable endophytic bacteria from the salt marsh plant *Halimione portulacoides*: phylogenetic diversity, functional characterization, and influence of metal(loid) contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 10200-10214.
- Figueiredo, N., Canário, J., O'Driscoll, N. J., Duarte, A., & Carvalho, C. (2016). Aerobic Mercury-resistant bacteria alter Mercury speciation and. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60 - 67.
- Gabriel, J., Švec, K., Koliňová, D., Tlustoš, P., & Száková, J. (2016). Translocation of mercury from substrate to fruit bodies of *Panellus stipticus*, *Psilocybecubensis*, *Schizophyllum commune* and *Stropharia rugosoannulata* on oat flakes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184 - 189.
- Garzón Gutiérrez, J. M., & Rodríguez Miranda, J. P. (2015). Gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio proveniente de la minería aurífera a nivel mundial: Estado del arte. *Rev Univ. Salud.*, 132-144.
- Giovanella, A. P., Costa, N. P., Schaffer, M. C., Peralba, M. C., Camargo, F. A., & Bento, F. M. (2015). Detoxification of mercury by bacteria using crude glycerol from biodiesel as a carbon source. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1-13.
- Giovanella, P., Cabral, L., Gianello, C., Bento, F. M., & Oliveira Camargo, F. A. (2016). Mercury (II) removal by resistant bacterial isolates and mercuric (II) reductase activity in a new strain of *Pseudomonas* sp. B50A. *New Biotechnology*, 216 - 223.
- Gomes, M. V., de Souza, R. R., Teles, V. S., & Araújo Méndez, É. (2014). Phytoremediation of water contaminated with mercury using *Typha domingensis* in constructed wetland. *Chemosphere*, 228 – 233.
- Gómez-Sagasti, M. T., Alkorta, I., Becerril, J. M., Epelde, L., Anza, M., & Garbisu, C. (2012). Microbial monitoring of the recovery of soil quality during heavy metal phytoremediation. *Water, Air & Soil Pollution*, 3249-3262.
- Green-Ruiz, C. (2006). Mercury(II) removal from aqueous solutions by nonviable *Bacillus* sp. from a tropical estuary. *Bioresource Technology*, 1907–1911.
- Gupta, A., Vidyarthi, S., & Sankararamakrishnan, N. (2014). Thiol functionalized sugarcane bagasse—A low cost adsorbent for mercury remediation from compact fluorescent bulbs and contaminated water streams. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1378-1385.
- Gupta, S., & Nirwan, J. (2015). Evaluation of mercury biotransformation by heavy metal-tolerant *Alcaligenes* strain isolated from industrial sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 955-1002.

- Hammond, D. S. (2013). *Gestión del Impacto de la explotación minera a cielo abierto sobre el agua dulce en america latina*. BID Unidad de salvaguardias ambientales.
- He, F., Gao, J., Pierce, E., Strong, P. J., Wang, H., & Liang, L. (2015). In situ remediation technologies for mercury-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 8124-8147.
- Hernández Balderas, P., Morales Roa, G., Silva Ramírez, M. T., Romo Romero, M., & Sevilla Rodríguez, E. (2017). Effective mercury(II) bioremoval from aqueous solution, and its electrochemical determination. *Chemosphere*, 314-321.
- Hernández, A. R. (12 de Mayo de 2012). Ilegalidad minera, problema social y de criminalidad. *UN Periódico, Unidad de Medios de Comunicación*, págs. 1 - 2.
- Huang, S., & Lin, G. (2015). Biosorption of Hg(II) and Cu(II) by biomass of dried Sargassum fusiforme in aquatic solution. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*.
- Hutchison, A., Atwood, D., & Santilliann-Jiminez, Q. (2008). The removal of mercury from water by open chain ligands containing multiple sulfurs. *Journal of Hazardous Materials*, 458 – 465.
- Irawati, W., Patricia , Soraya, Y., & Baskoro , A. (2012). A Study on Mercury-Resistant Bacteria Isolated from a Gold Mine in Pongkor Village, Bogor, Indonesia. *HAYATI Journal of Biosciences*, 197- 200.
- Jain, C. K., Malik, D. S., & Yadak, A. K. (2016). Applicability of plant based biosorbents in the removal of heavy metals: a review. *Environmental Processes*, 495-523.
- Jan, A., Azam, M., Choi, I., Ali, A., & Rizwanul Haq, Q. (2016). Analysis for the presence of determinants involved in the transport of mercury across bacterial membrane from polluted water bodies of India. *Brazilian journal of microbiology*, 55 - 62.
- Jumbo, M. J., & Campoverde, E. F. (10 de Enero de 2012). Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (Lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.
- Kavamura, V. N., & Esposito, E. (2010). Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals. *Biotechnology Advances*, 61-69.
- Khan, M. S., Zaidi, A., Wani, P. A., & Oves, M. (2009). Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils. *Environmental Chemistry Letters*, 1-19.
- Khani, R., Moudi, M., & Khojeh, V. (2016). Contamination level, distribution and health risk assessment of heavy and toxic metallic and metalloid elements in a cultivated mushroom Pleurotus florida (Mont.) singer. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-10.

- Kurniati, E., Arfarita, N., & Imai, T. (2014). Potential Use of *Aspergillus Flavus* Strain KRP1 in Utilization of Mercury Contaminant. *Procedia Environmental Sciences*, 254-260.
- Kurniati, E., Arfarita, N., Imai, T., Higuchi, T., Kanno, A., Yamamoto, K., & Sekine, M. (2014). Potential bioremediation of mercury-contaminated substrate using filamentous fungi isolated from forest soil. *Journal of Environmental Sciences*, 1223-1231.
- Kurniati, E., Arfarita, N., Imai, T., Higuchi, T., Kanno, A., Yamamoto, K., & Sekine, M. (2014). Potential of Microscopic Fungi Isolated from Mercury Contaminated Soils to Accumulate and Volatilize Mercury(II). *Journal of Environmental Sciences*, 1223 – 1231.
- Lata, S., Singh, P. K., & Samadder, S. R. (2015). Regeneration of adsorbents and recovery of heavy metals: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1461-1478.
- Leung, H. M., Wang, Z. W., Ye, Z. H., Yung, K. L., Peng, X. L., & Cheung, K. C. (2013). Interactions Between Arbuscular Mycorrhizae and Plants in Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils: A Review. *Pedosphere*, 549 – 563.
- Li, K., & Ramakrishna, W. (2011). Effect of multiple metal resistant bacteria from contaminated lake sediments on metal accumulation and plant growth. *Journal of Hazardous Materials*, 531 – 539.
- Lizarazo Becerra, Y. M., & Orjuela Gutiérrez, M. I. (2013). Sistema de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Lizcano, M. R. (2004). Estudio de la biorremediación como una alternativa en la mitigación de la contaminación ambiental. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- López, A. D., Ramírez, C. G., García, F. P., Ibarra, J. V., & Sandoval, O. A. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 597- 612.
- Lopez, J. S. (20 de Noviembre de 2015). Diseño y construcción de un prototipo escala piloto de humedal construido, para el tratamiento de agua residual del proceso de cianuración de la mina La Cascada. Manizales: Universidad Católica de Manizales.
- Ma, F., Peng, C., Hou, D., Wu, B., Zhang, Q., Li, F., & Gu, Q. (2015). Citric acid facilitated thermal treatment: An innovative method for the remediation of mercury contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 546 – 552.
- Mahbub, K. R., Krishnan, K., Megharaj, M., & Naidu, R. (2016). Bioremediation potential of a highly mercury resistant bacterial strain *Sphingobium* SA2 isolated from contaminated soil. *Chemosphere*, 330 - 337.

- Mani, D., & Kumar, C. (2014). Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: an overview with special reference to phytoremediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 843-872.
- Marín, G. Á., & Narvaez, D. A. (Noviembre de 2013). Análisis del impacto ecosistémico en la zona de influencia de la microcuenca de la quebrada Cascabel por afectación al recurso hídrico generado en el proceso de explotación aurífera en Marmato, Caldas, Colombia. Manizales: Universidad de Manizales, Centro de Investigaciones.
- Maroto Arroyo, M. E., & Rogel Quesada, J. M. (s.f.). Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos. *GEOCISA. Div. Protección Ambiental de Suelos*, 9.
- Marrugo-Negrete, J., Durango, J. H., Pinedo, J. H., Olivero, J. V., & Díez, S. (2015). Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*. *Chemosphere*, 58 – 63.
- Martelo, J., & Borrero, J. A. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado. *Ingeniería y Ciencia*, 221–243.
- Martín, J. S., & Gallego, J. L. (2003). Fundamentos y aspectos microbiológicos biorremediación. *Universidad de Oviedo*, 12-16.
- Martínez, A. (2014). *Minería y medio ambiente en Colombia*. Bogotá: Fedesarrollo-Centro de Investigación Económica y Social.
- Martínez, A., & Aguilar, T. (2013). *Estudio sobre los impactos socio-económicos del sector minero en Colombia: Encadenamientos sectoriales*. Fedesarrollo.
- Masciandaro, G., Macci, C., Peruzzi, E., Cercanti, B., & Doni, S. (2013). Organic matter-microorganism-plant in soil bioremediation: a synergic approach. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 339-419.
- Mendoza, J. A. (Abril de 2014). Proyecto de minería de oro la colosa, identificación ambiental de la zona de explotación y sus impactos. Bogotá: Facultad de Estudios Ambientales y Rurales U. Javeriana.
- Ministerio de Justicia. (2016). *Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota*. Oficina de las naciones unidas para la droga y el delito.
- Ministerio de Minas. (2001). *Ley 685 por la cual se expide el código de minas y se dictan otras disposiciones*. Bogotá: Diario Oficial 44.545.
- Ministerio de Minas. (2012). *Colombia Minera*. Fedesarrollo.

- Ministerio de Minas. (2014). *Indicadores de la minería en Colombia*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética.
- Ministerio de Minas. (2014). *Plan Nacional de Ordenamiento Minero PNOM." Unidad de planeación minero energética Upme Documento anexo a resolución*. Plan Nacional de Ordenamiento Minero - PNOM.
- Ministerio de Minas. (2016). *Política minera de Colombia, bases para la minería del futuro*. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. (2001). *Ley 685 por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones*. Bogotá: Diario Oficial 44.545.
- Mishra, V. K., Rani, A. U., Vinita Pathak, & Tripathi, B. (2008). Phytoremediation of Mercury and Arsenic from Tropical Opencast Coalmine Effluent Through Naturally Occurring Aquatic Macrophytes. *Water, Air, and Soil Pollution*, 303 – 314.
- Mishra, V. K., Tripathi, B., & Kim, K.-H. (2009). Removal and accumulation of mercury by aquatic macrophytes from an open cast coal mine effluent. *Journal of Hazardous Materials*, 749 – 754.
- Mondal, D. K., Nandi, B. K., & Purkait, M. (2013). Removal of mercury (II) from aqueous solution using bamboo leaf powder: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 891– 898.
- Okenicová, L., Zemberyová, M., & Prochazková, S. (2016). Biosorbents for solid-phase extraction of toxic elements in waters. *Environmental Chemistry Letters*, 67-77.
- Osorio, A. (31 de Mayo de 2015). *En cifras: Así está la minería en Caldas y Colombia*. Obtenido de <http://www.lapatria.com/caldas/en-cifras-asi-esta-la-mineria-en-caldas-y-colombia-197285>
- Pacchioni, E. G., Moreno, A. S., & Roberto Asmat. (2014). *Minería informal aurífera en Colombia principales resultados del levantamiento de la línea de base*. Fedesarrollo.
- Padmavathramma, P. K., & Yi, L. Y. (2007). Phytoremeditaion technology: hyperaccumulation metals in plants. *Water, Air and Soil Pollution*, 105-126.
- Paisio, C. E., Gonzales, P. S., Tolano, M. A., & Agostini, E. (s.f.). Remediación biológica de mercurio: recientes avances. *Rev. Latinoam Biotecnol Amb Algal*, 119-146.
- Paisio, C. E., González, P. S., M. A., & E. A. (2012). Remediación biológica de Mercurio: Recientes avances. *Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal*, 119-146.
- Paisio, C. E., González, P. S., Talano, M. A., & Agostini, E. (2012). Remediación biológica de Mercurio: Recientes avances. *Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal*, 119-146.

- Pepi, M., Gaggi, C., Bernardini, E., Focardi, S., Lobianco, A., Ruta, M., . . . Focardi, S. (2011). Mercury-resistant bacterial strains *Pseudomonas* and *Psychrobacter* spp. isolated from sediments of Orbetello Lagoon (Italy) and their possible use in bioremediation processes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85 - 91.
- Pérez, B. F. (2007). Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina. Oviedo: Departamento de ciencia de los materiales .
- Plaza, J., Viera, M., Donati, E., & Guibal, E. (2011). Biosorption of mercury by *Macrocystis pyrifera* and *Undaria pinnatifida*: Influence of zinc, cadmium and nickel. *Journal of Environmental Sciences*, 1778 –1786.
- Plumlee, G. S., Durant, J. T., Morman, S. A., Neri, A., Wolf, R. E., Dooyema, C. A., . . . Brown, M. J. (2013). Linking geological and health sciences to assess childhood lead poisoning from artisanal gold mining in Nigeria. *Environ Health Perspect*, 744 - 750.
- PNUMA - MADS. (2012). *Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala*. Bogotá: PNUMA - – MADS.
- PNUMA. (2008). *El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala*.
- Puglisi, I., Faedda, R., Sanzaro, V., Lo Piero, A., Petrone, G., & Cacciola, S. (2012). Identification of differentially expressed genes in response to mercury I and II stress in *Trichoderma harzianum*. *Gene*, 325 – 330.
- Pulgarín, M. d. (Junio de 2012). Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de sedimentos contaminados con hidrocarburos procedentes de las estaciones de servicio en risaralda. Pereira, Risaralda, Colombia: Universidad Tecnológica de pereira.
- Quiñones Bolaños, E., Tejada, C., & Ruíz, V. (2014). Remediación de aguas contaminadas con cromo utilizando diferentes biomateriales residuales. *Revista Ciencias e Ingeniería al Día*, 25-42.
- Rai, P. K., & Tripathi, B. (2009). Comparative assessment of *Azolla pinnata* and *Vallisneria spiralis* in Hg removal from G.B. Pant Sagar of Singrauli Industrial region, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 75 – 84.
- Rai, P. K., & Tripathi, B. D. (2009). Comparative assessment of *Azolla pinnata* and *Vallisneria spiralis* in Hg removal from G.B. Pant Sagar of Singrauli Industrial region, India. *Environ Monit Assess*, 75-84.
- Rajamohan, N., M. R., & Dilipkumar, M. (2014). Parametric and kinetic studies on biosorption of mercury using modified *Phoenix dactylifera* biomass. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2622 – 2627.

- Ramaiah, N., Jaysankar, D., & Vardanyan, L. (2008). Detoxification of Toxic Heavy Metals by Marine Bacteria Highly Resistant to Mercury. *Mar Biotechnol*, 471 – 477.
- Rodríguez Conde, S. (17 de Junio de 2011). Potencial de las bacterias del suelo en la rizorremediación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). Universidad de Granada. Departamento de Microbiología.
- Rojas, J. G., & Gárate, Z. O. (2011). Biorremediación de la Contaminación por Mercurio en la Minería Informal. *Minería & medioambiente*, 31.
- Romero, M. M., Iguá, D. M., & Boyacá, Y. S. (Junio de 2015). Evaluación de un sistema de biorremediación de aguas residuales porcícolas en la finca el porvenir vereda suncichoque y su reutilización en fines agroambientales. Bogotá, Colombia: Corporación universitaria minuto de Dios.
- Salman, M., Athar, M., & Farooq, V. (2015). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using indigenous and modified lignocellulosic materials. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 211-228.
- Sánchez Cortés, J. C., & Vanegas Sánchez, P. (2015). *Oro ilegal, alternativa criminal*. Bogotá: Universidad Nueva Granada.
- Sas-Nowosielska, A., Galimska-Stypa, R., Kucharski, R., Zielonka, U., Małkowski, E., & Gray, L. (2008). Remediation aspect of microbial changes of plant rhizosphere in mercury contaminated soil. *Environ Monit Assess*, 101 – 109.
- Sauders, J. E., Jastrzemski, B. G., Buckey, J. C., Enriquez, D., VacKenzie, T. A., & Karagas, M. R. (2013). Hearing loss and heavy metal toxicity in a Nicaraguan mining community: audiological results and case reports. *Audiol Neurootol*, 101 - 103.
- Sen, A., Pereira, H., Olivella, M. A., & Villaescusa, I. (2015). Heavy metals removal in aqueous environments using bark as a biosorbent. *Internacional Journal of Environmental Science and Technology*, 391-404.
- Sharma, S., Singh, B., & Manchanda, V. K. (2015). Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water. *Environmental Science and Pollution Research*, 946-962.
- Singh, A., & Prasad, S. M. (2015). Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement. *Internacional Journal of Environmental Science and Technology*, 353-366.
- Singh, J. S., Abhilash, P. C., Singh, H. B., Singh, R. P., & Singh, D. P. (2011). Genetically engineered bacteria: An emerging tool for environmental remediation and future research perspectives. *Gene*, 1-9.

- Sinha, A., & Khare, S. K. (2011). Mercury bioaccumulation and simultaneous nanoparticle synthesis by *Enterobacter* sp. cells. *Bioresource Technology*, 4281-4284.
- Sinha, A., & Khare, S. K. (2012). Mercury bioremediation by mercury accumulating *Enterobacter* sp. cells and its alginate immobilized application. *Biodegradation*, 25 - 34.
- Sinha, A., Kishore, K. P., & Kumar, S. K. (2012). Studies on mercury bioremediation by alginate immobilized mercury tolerant *Bacillus cereus* cells. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1 - 8.
- Skinner, K., Wright, N., & Porter-Goff, E. (2007). Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plants. *Environmental Pollution*, 234 - 237.
- Sorkhoh, N., Ali, N., Al-Awadhi, H., Dashti, N., Al-Mailem, D., Eliyas, M., & Radwan, S. (2010). Phytoremediation of mercury in pristine and crude oil contaminated soils: Contributions of rhizobacteria and their host plants to mercury removal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1998 – 2003.
- Srivastava, S., Agrawal, S. B., & Mondal, M. K. (2015). A review on progress of heavy metal removal using adsorbents of microbial and planta origin. *Environ Sci Pollut Res Int*, 15386-15415.
- Swapna, K., Salim, N., Chandra, R., & Puthur, J. (2015). Structural changes in response to bioaccumulation of iron and mercury in *Chromolaena odorata* (L.) King & Robins. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187-551.
- Tajes-Martínez, P., Beceiro-González, E., Muniategui-Lorenzo, S., & D. P.-R. (2006). Micro-columns packed with *Chlorella vulgaris* immobilised on silica gel for mercury speciation. *Talanta*, 1489–1496.
- Timarán, F. P., Rodríguez, R. Á., & Avelló, A. R. (2005). Métodos para reducir la contaminación por mercurio en la pequeña minería del oro. *Revista de Metalurgia*.
- Torres Delgado, K., & Zuluaga Montoya, T. (2009). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- Torres Gutiérrez, J. I., Pinzón Salcedo, M., Esquivia Zapata, M., Parra Pizarro, A., & Espitia Jiménez, E. H. (2010). *La explotación ilícita de recursos minerales en Colombia casos Valle del Cauca (Río Dagua) – Chocó (Río San Juan)*. Contraloría delegada para el sector minas y energía.
- Tovar, C. T., Ortiz, Á. V., & Jaraba, L. G. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 109-123.
- Ulla, A., Mushtaq, H., Ali, H., Munis, M. F., Javed, M. T., & Chaundhary, H. J. (2015). Diazotrophs-assisted phytoremediation of heavy metals: a novel approach. *Environ Sct Pollut Res Int*, 2505-2514.

- Urík, M., Hlodák, M., Mikušová, P., & Matúš, P. (2014). Potential of Microscopic Fungi Isolated from Mercury Contaminated Soils to Accumulate and Volatilize Mercury(II). *Water, Air, & Soil Pollution*.
- Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., . . . Mech, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environ Sci Pollut Res Int*, 765-794.
- Vela, M. L. (17 de Febrero de 2014). Recuperación y reciclamiento de residuales de nitrógeno y fosforo del cultivo de *litopenaeus vannamei* mediante sistemas de fitorremediación. La paz, Baja California sur: Centro de investigaciones biológicas del noroeste, S.C.
- Venkateswarly, K., Nirola, R., Kuppusamy, S., Thavamani, P., Naidu, R., & Megharaj, M. (2016). Abandoned metalliferous mines: ecological impacts and potential approaches for reclamation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 327-354.
- Verbel, J. O. (2010). Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana. Universidad Nacional de Colombia.
- Villanueva, R. C. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 131-143.
- Villar, L. (2016). *Tendencia economica*. Fedesarrollo.
- Villas Boas, R., & Sánchez, M. (2006). *Tecnologías limpias en las industrias extractivas minero-metalúrgica y petrolera*. Santa Cruz de la Sierra: Alfa.
- Wang, J., Feng, X., Anderson, C., Qiu, G., Pinga, L., & Bao, Z. (2011). Ammonium thiosulphate enhanced phytoextraction from mercury contaminated soil – Results from a greenhouse study. *Journal of Hazardous Materials*, 119 –127.
- Wang, J., Feng, X., Anderson, C., Xing, Y., & Shang, L. (2012). Remediation of mercury contaminated sites-A review. *Journal of Hazardous Materials*, 221-222.
- Wang, T., & Sun, H. (2013). Biosorption of heavy metals from aqueous solution by UV-mutant *Bacillus subtilis*. *Environ Sci Pollut Res Int*, 7450-7463.
- Wang, X., Zhang, D., Pan, X., Lee, D.-J., Al-Misned, F., Golam, M. M., & Gadd, G. (2017). Aerobic and anaerobic biosynthesis of nano-selenium for remediation of mercury contaminated soil. *Chemosphere*, 266 - 273.
- Yavuz, H., Denizli, A., Güngöres, H., Safarikova, M., & Safarik, I. (2006). Biosorption of mercury on magnetically modified yeast cells. *Separation and Purification Technology*, 253–260.
- Zawadzki, K., Sokołowska, K., Kolon, K., A. D., & Kempers, A. (2014). Mercury in *Pleurozium schreberi* and *Polytrichum commune* from areas with various levels of Hg pollution – an

accumulation and desorption experiment with microscopic observations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 36 – 41.